

P. THOMASSET

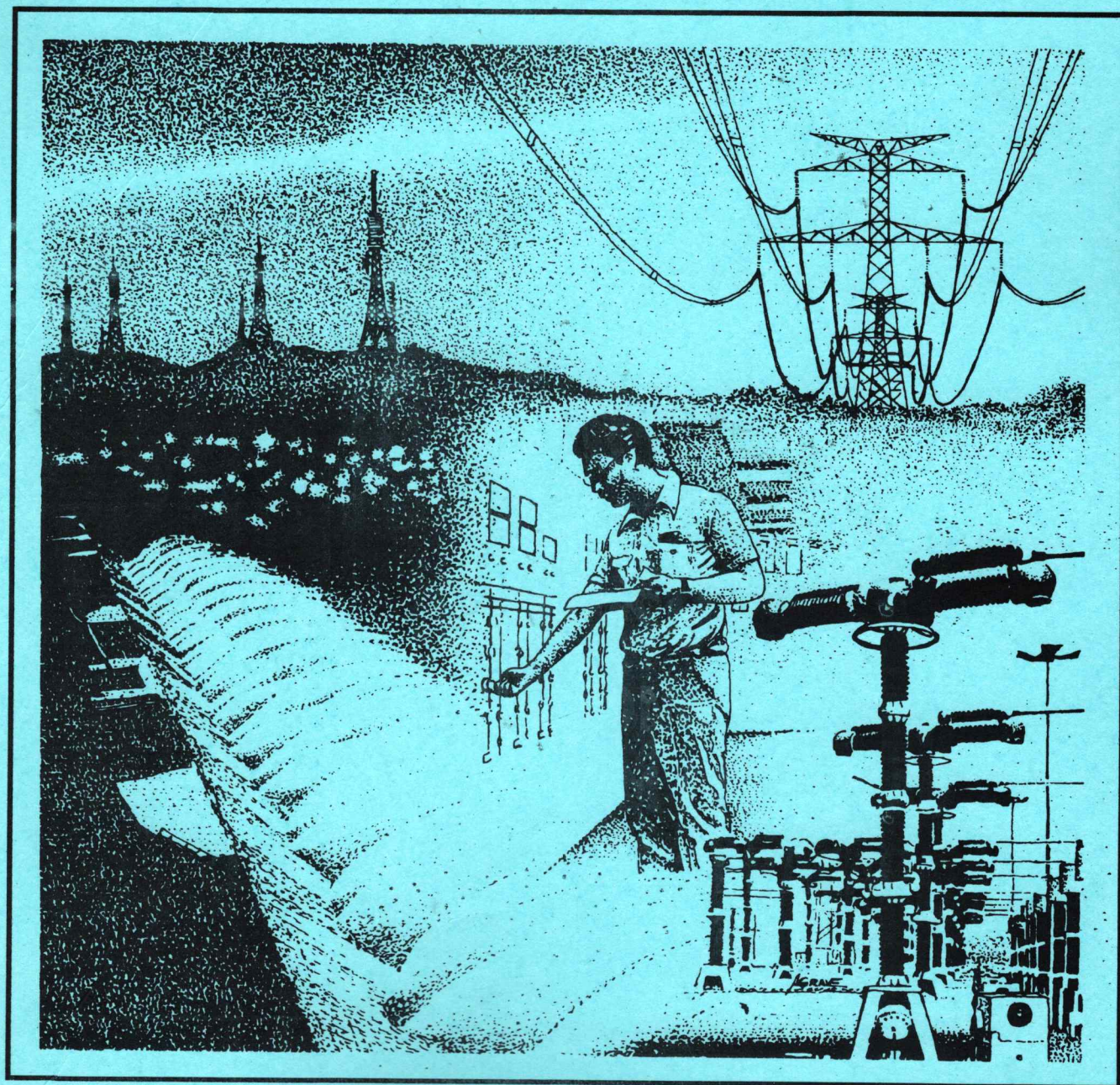
03/03/98

3

CALCULO

I_{cc}

V CURSO INTERNACIONAL DE TREINAMENTO EM PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO



JFY 1998

SÉRIE TREINAMENTO, 230

CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO
PGT/PSD

Apostila 3052

HUMBERTO de Carvalho

Ilha Solteira
1997

PH - Departamento de Recursos Humanos
PHD - Divisão de Políticas e Desenvolvimento
PHDI - Centro de Treinamento Técnico de Ilha Solteira

M.O. 9.415.313

Al. Maranhão, s/nº - Ilha Solteira - SP

Tel. (018) 762-2973

1. edição, 1986

4.. reimpressão/1997

Depósito Legal: Biblioteca

CESP - CATALOGAÇÃO NA FONTE

CESP.

Cálculo de curto-circuito - PGT/PSD. / CESP, -- Humberto de Carvalho 4.. edição Ilha Solteira, 1997

79 p. -- (Série Treinamento,230)

1. Curto-circuito. 2. Estudo e Ensino. I. Título. II. Série.

SUMÁRIO

	P.
Introdução.....	03
Curto-circuitos Trifásicos Balanceados.....	04
Transitórios de um Gerador Síncrono durante um Curto Trifásico.....	09
Método de Cálculo de Curto.....	16
Teoria do Cálculo de Curto-circuito Trifásico.....	19
Exercício Proposto.....	23
Curto-circuitos Fase-terra - Teoria.....	24
Seqüência Prática para Cálculo.....	29
Diagrama Elucidativo.....	41
Cálculo das Correntes nas Fases B e C do TR1.....	42
Esquema Trifásico Elucidativo.....	43
Curto-circuito Fase-fase (Fase B e Fase C).....	45
Curto-circuito Fase-fase-terra (Fases B e C).....	49
Exercício de Cálculo de Curto-circuito.....	53
Diagrama de Impedância.....	56
Diagrama Elucidativo (Fase-terra).....	64
Cálculo de Curto-circuito Trifásico.....	65
Cálculo de Curto-circuito Bifásico.....	67
Cálculo de Curto-circuito Bifásico e Terra.....	72
Bibliografia.....	79

INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa fornecer ao técnico ou engenheiro de proteção de Sistemas Elétricos de Potência a parte teórica e exemplos de cálculo de curto-circuito aplicados em nossos cursos de proteção.

O módulo de cálculo de curto-circuito constitui-se em um pré-requisito indispensável, no que se refere a coordenação e ajustes dos relés de proteção (linhas, geradores, barras e transformadores). A técnica para cálculo de curto-circuito requer bons conhecimentos de "Componentes Simétricas" e "Cálculos com Valores em PU".

As faltas (curtos-circuitos) em sistemas trifásicos podem ser classificadas em 4 categorias:

- a) Faltas trifásicas balanceadas;
- b) Faltas fase-terra;
- c) Faltas fase-fase sem terra;
- d) Faltas fase-fase com terra.

A grande maioria de curtos-circuitos que ocorrem num sistema são do tipo *fase-terra*, resultantes principalmente de descargas atmosféricas e consequentes contornos de isoladores.

A ocorrência de curto trifásico é a mais rara e o seu cálculo é o mais fácil das 4 categorias indicadas acima.

Como qualquer falta assimétrica provoca a circulação de correntes desequilibradas no sistema, o método das componentes simétricas é muito útil numa análise que use a determinação das correntes e das tensões em todas as partes do sistema quando da ocorrência da falta.

01. CURTOS-CIRCUITOS TRIFÁSICOS BALANCEADOS

Transitórios num gerador síncrono, durante um curto trifásico, considerando a indutância do gerador constante.

Quando uma máquina está gerando uma tensão senoidal, é um fato conhecido que o valor da corrente de curto-circuito, no período transitório, será parcialmente dependente do instante do ciclo no qual a falta ocorre (analogamente ao caso da corrente de magnetização transitória para um transformador).

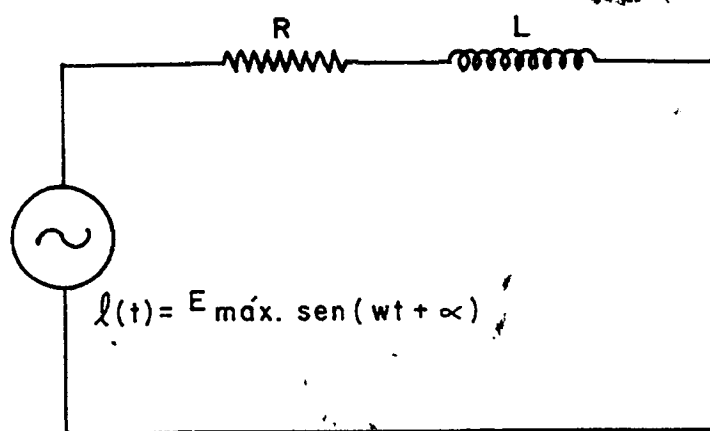


Figura 01

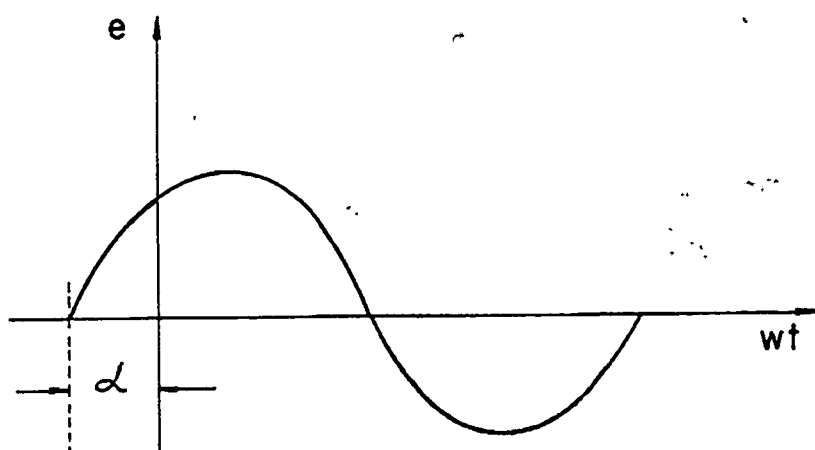


Figura 02

Representação monofásica de um gerador síncrono, supondo indutância constante.

Consideremos que um curto trifásico ocorra nos terminais do gerador, no instante $t = 0$ (figura 01). A corrente resultante, em função do tempo, será:

$$i(t) = \frac{|E_{máx}|}{|Z|} [\text{sen}(Wt + \alpha - \theta) - \text{sen}(\alpha - \theta) e^{-Rt/L}]$$

onde:

$$Z = \sqrt{R^2 + W^2 L^2}$$

$$W = 2\pi f$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{WL}{R}\right)$$

O primeiro termo da equação acima varia senoidalmente com o tempo. O segundo termo é *não periódico* e decai exponencialmente com uma constante de tempo L/R ; sendo chamado de componente DC da corrente. As figuras 03, 04 e 05 ilustram o comentário.

Considerando por exemplo:

$$(\alpha - \theta) = -\frac{\pi}{2}$$

temos:

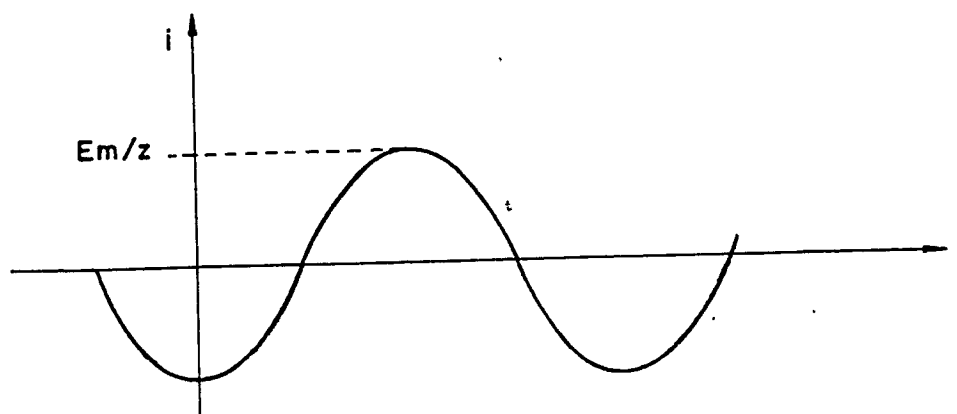


Figura 03 - Primeiro termo da expressão com $(\alpha - \theta) = -\pi/2$

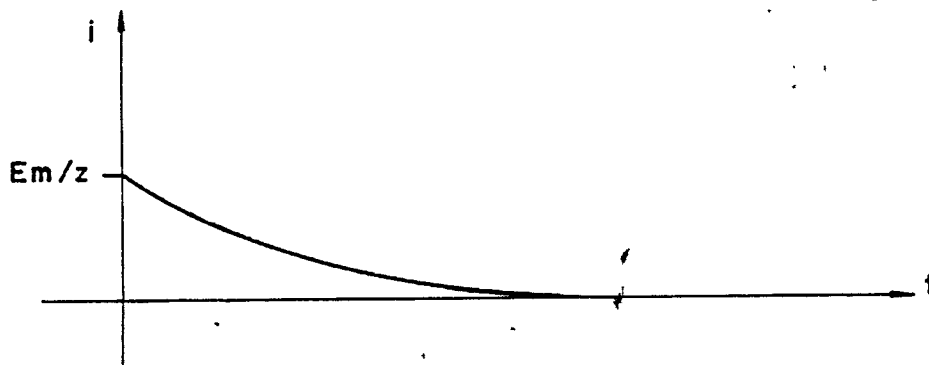


Figura 04 - Segundo termo da expressão com $(\alpha - \theta) = -\pi/2$

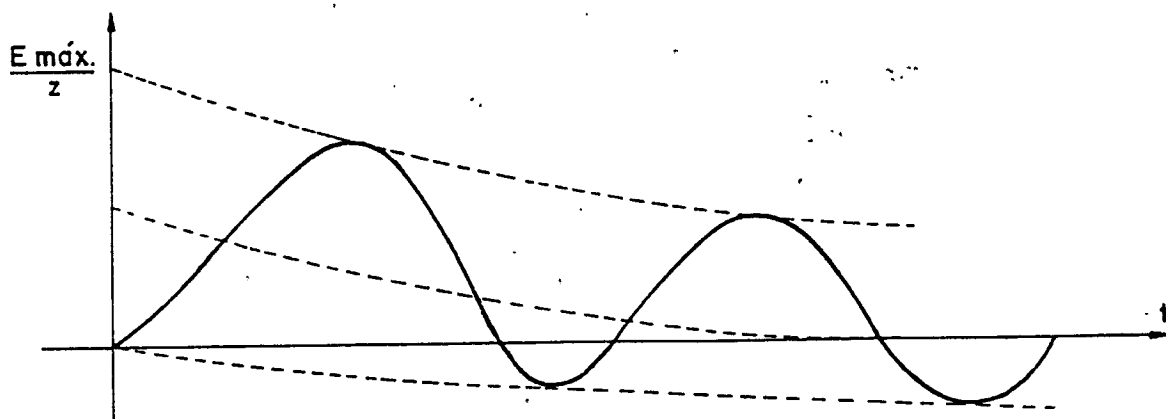
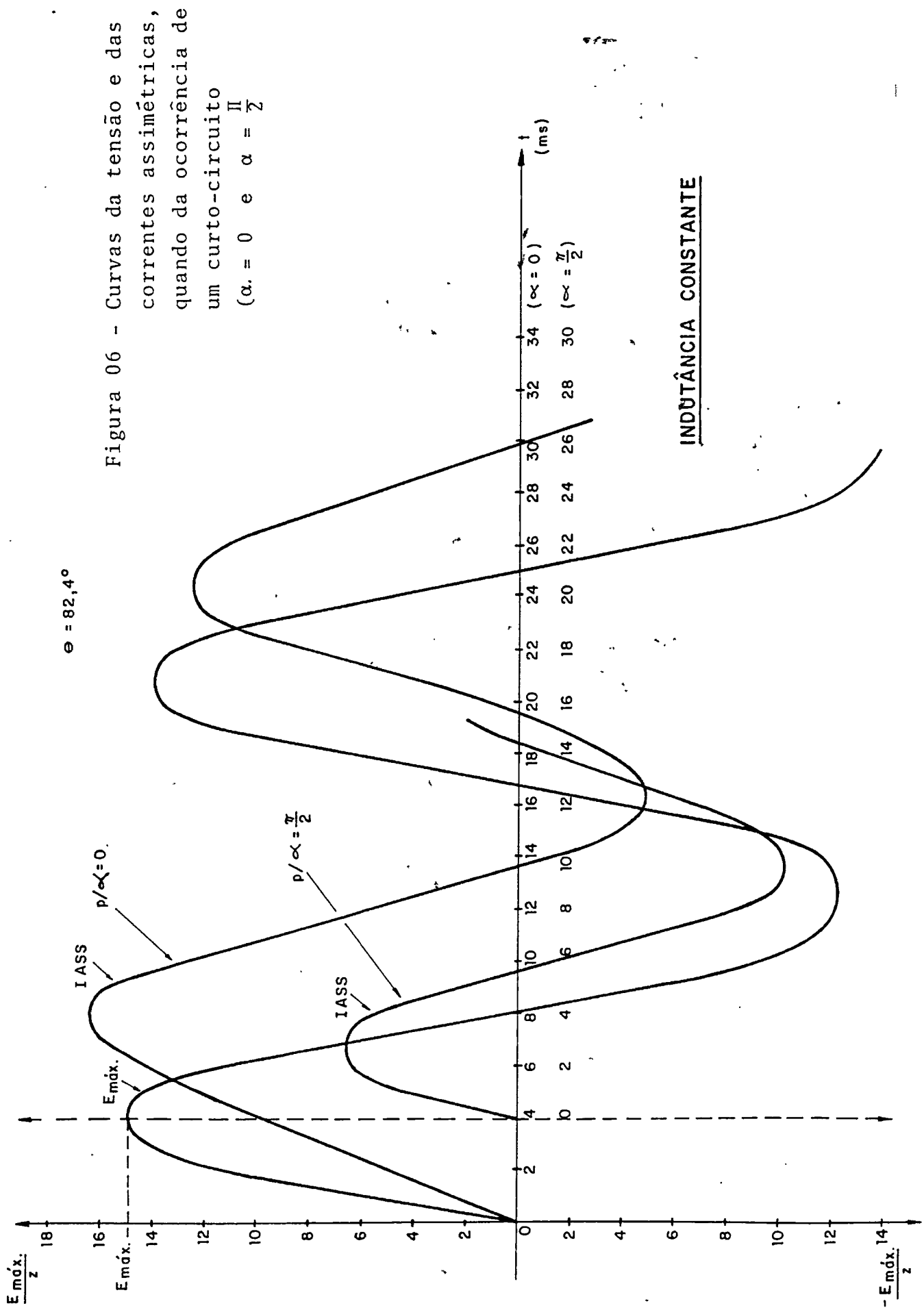


Figura 05 - Composição das figuras 03 e 04 para $(\alpha - \theta) = -\pi/2$



Para cálculos de curto-circuito, na prática, é costume inicialmente desprezar a componente transitória (isto é, considerar $\alpha - \theta = 0$) e apenas considerá-la após os cálculos para determinadas aplicações (escolha de disjuntores, por exemplo).

Neste item, foi considerado L constante, o que não é na realidade, para geradores síncronos em período de transição. Foi visto apenas a título de ilustração.

02. TRANSITÓRIOS DE UM GERADOR SÍNCRONO DURANTE UM CURTO TRIFÁSICO

Neste item, desprezaremos a componente transitória, isto é, supomos que o curto-circuito ocorre no instante $t = 0$, com $\alpha - \theta = 0$.

A indutância não pode ser considerada constante.

O estudo dos geradores em regime transitório inclui os casos de curto-circuito, aos quais correspondem as mais violentas perturbações no funcionamento. O caso extremo corresponde ao curto-circuito trifásico nos terminais de um gerador que se encontra funcionando em condições normais. Em intervalos de tempo tão curtos, a velocidade e a corrente de campo pouco variam, a reação de armadura e conseqüentemente as reatâncias X_s , X_d e X_q podem, todavia, sofrer variações consideráveis. Ao ser estabelecido um curto-circuito trifásico em um gerador, a corrente de armadura aumenta bruscamente variando também o ângulo de fase com a fem (E_0). Em conseqüência, a reação de armadura varia de intensidade e se desloca no espaço em relação ao campo do rotor, resultando uma alteração no campo magnético do entreferro.

A variação do campo magnético do entreferro provoca a circulação de correntes induzidas nos circuitos do rotor (enrolamento de campo, barras amortecedoras e na própria

estrutura metálica do rotor).

Essas correntes se superpõem à corrente de excitação, provocando uma variação do fluxo magnético do rotor.

Os fluxos magnéticos das correntes induzidas no rotor tendem a se opor ao aumento do fluxo da armadura, enfraquecendo-o e em consequência reduzindo a reatância aparente da armadura.

Portanto, o efeito dessa corrente induzida do rotor, que resulta na redução temporária da indutância sentida no lado do estator; em consequência do enfraquecimento do fluxo de reação do induzido, devido ao circuito de baixa permeabilidade magnética que ele está obrigado a percorrer.

Sabendo-se que a relutância é inversamente proporcional à permeabilidade magnética, temos, portanto, maior relutância e menor indutância ou reatância.

$$R = \frac{10^7}{4\pi} \times \frac{\ell_m}{\mu \times \text{Sm}^2}$$

$$L = \frac{N^2}{R}$$

$$XL = WL^2$$

$$XL = W \cdot \frac{N^2}{R}$$

Ao se verificar o curto-circuito, a corrente de armadura cresce rapidamente até valores máximos; vão depois decrescendo até os valores correspondentes ao novo estado permanente. Portanto, no decorrer do tempo, a contar do início do curto-circuito, o caminho do fluxo de reação de armadura varia.

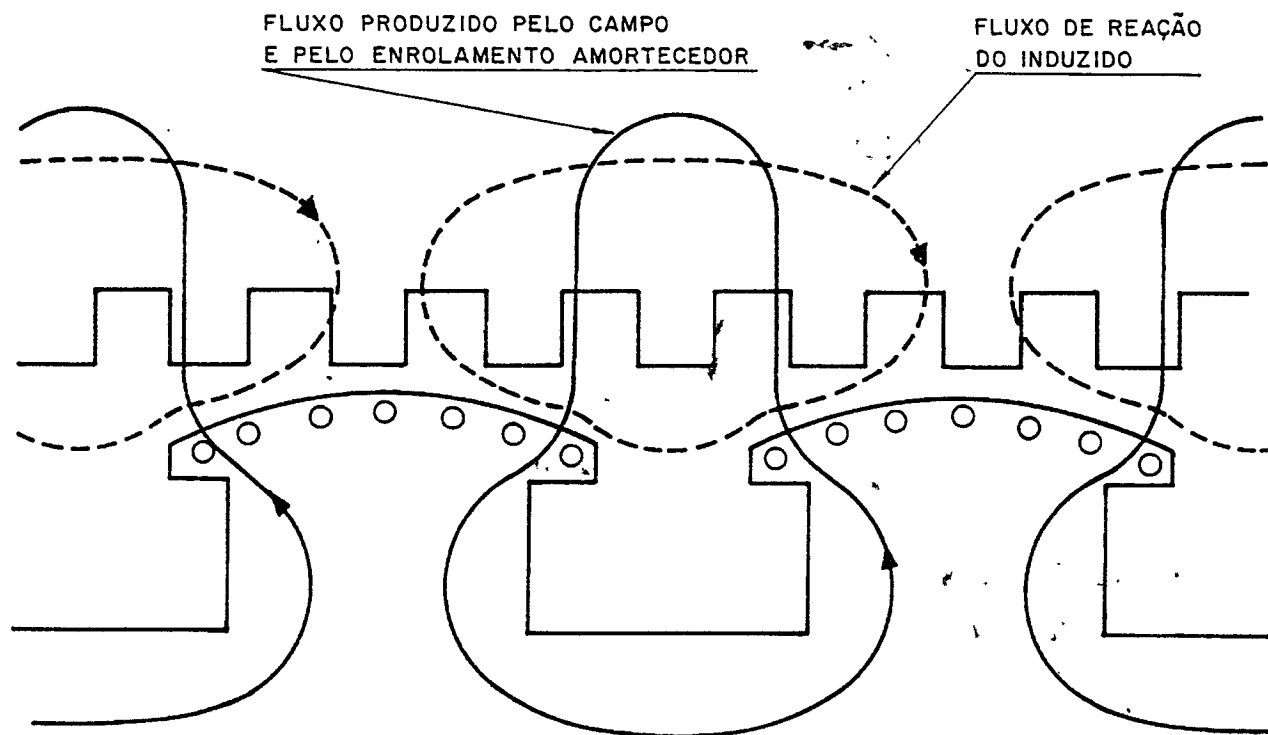


Figura 07 - Caminho do fluxo de reação logo após o início do curto-circuito (período subtransitório).

O fluxo criado pelo enrolamento amortecedor, alinhado com o fluxo produzido pelo campo, expulsa o fluxo produzido pelo estator para fora do pólo. O fluxo de reação do induzido, agora, não pode mais passar pelo ferro do pólo. Ele é obrigado a percorrer o ar do entreferro e o ar entre os pólos. É um caminho de permeabilidade magnética muito pobre, pois há muito ar neste caminho.

$$X''d \approx \frac{X_d}{4,5}$$

A vida útil de $X''d$, em cerca de 5 ciclos (0,08s para 60Hz).

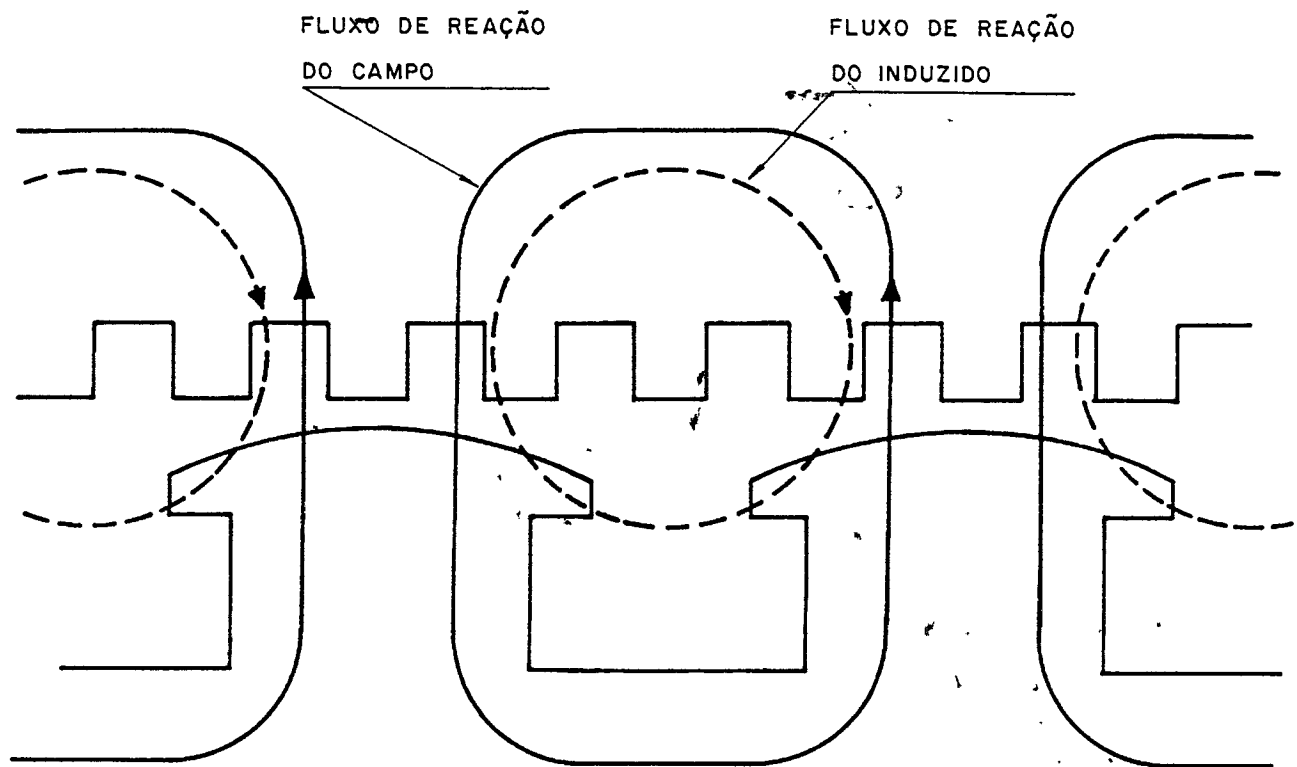


Figura 08 - Caminho do fluxo de reação após o período subtransitório (período transitório).

Devido à ausência do fluxo criado pelo enrolamento amortecedor, o fluxo de reação do induzido agora pode passar por um caminho de permeabilidade magnética melhorada. Já pode ocupar o ferro das pontas dos pólos. É óbvio que este fluxo já é mais forte que o fluxo da figura 07. A reatância do estator agora é maior que $X'd$ mas ainda bem menor que X_d . Esta reatância intermediária corresponde à reação do campo, é a "reatância transitória de eixo direto", $X'd$.

$$X'd = \frac{X_d}{3}$$

A vida útil de $X'd$ fica entre 0,5 e 1,2s.

Agora, as linhas de fluxo da reação do indutor aos poucos vão entrando para o ferro do pólo à medida que a reação do campo diminui. Ao final do regime transitório, o fluxo concatenado terá a forma mostrada na figura 09 e seu valor agora será diferente do fluxo anterior, adequado à nova condição de corrente no estator. Ao fim do regime transitório, volta a imperar a reatância X_d .

As reatâncias X_d , X'_d e X''_d têm fundamental importância sobre a estabilidade do gerador.

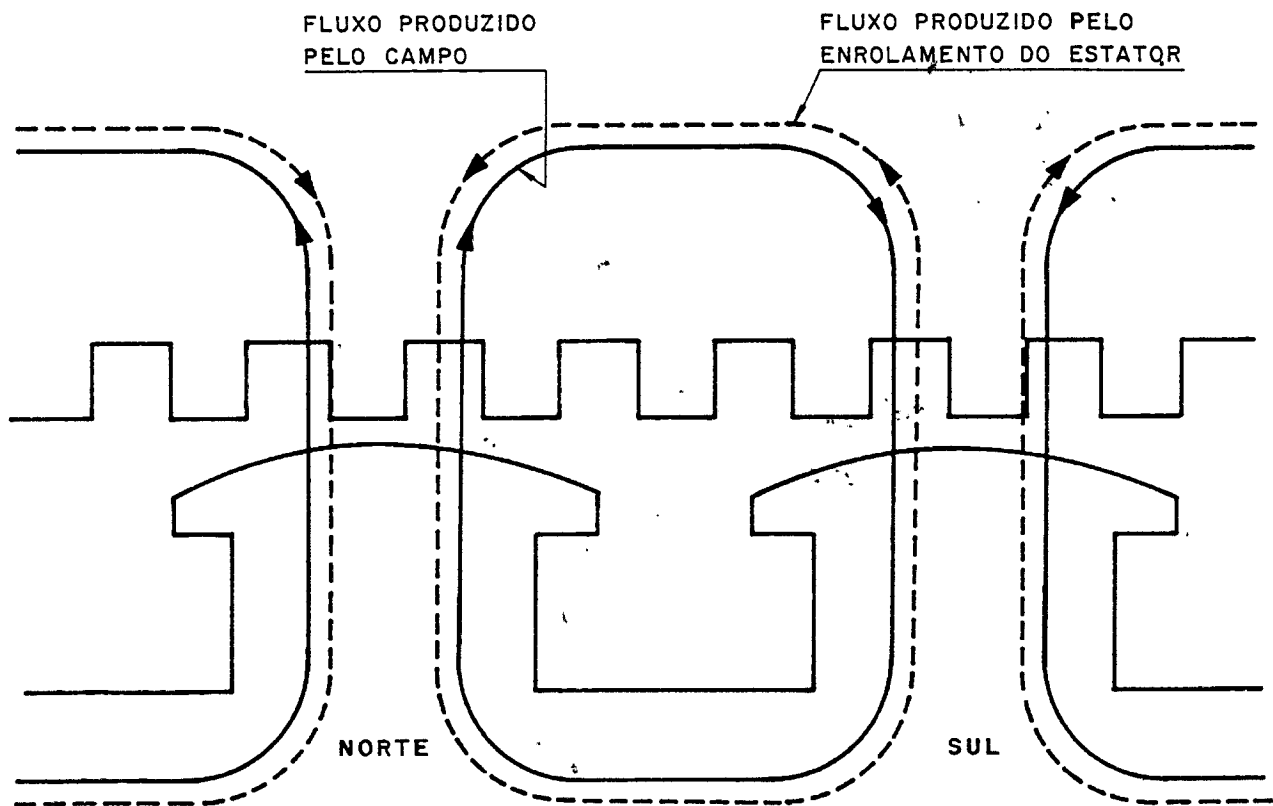


Figura 09 - Caminho do fluxo de reação em regime permanente.

O fluxo concatenado passa pelo pólo, entreferro e estator, pelo caminho de menor relutância magnética possível (caminho de maior permeabilidade magnética). Nesta situação estável existe a reatância X_d . O fluxo produzido pelo enrolamento do estator, que é o fluxo que cria no estator a corrente que dificulta a passagem de corrente entre gerador e sistema de potência, é a corrente que cria a reatância X_d .

As figuras 07, 08 e 09 mostram o que ocorre após o curto-circuito devido à influência do enrolamento amortecedor e do enrolamento de campo.

Na figura 07, o caminho do fluxo é de alta relutância (consequentemente, baixa indutância). Na figura 08, a relutância já é um pouco menor (indutância um pouco maior). Na figura 09 (regime permanente), a relutância do caminho é baixa (indutância maior).

Numa máquina de pólos salientes, a reatância total, que limita a corrente de curto-circuito, é a reatância síncrona do eixo direto.

$$X_d = X_{\text{reação armadura}} + X_{\text{dispersão}}$$

Pode-se, então, definir 3 valores de X_d , um para cada período de tempo, após o início do curto-circuito:

$$x = 2\pi fL$$

PERÍODO	REATÂNCIA	OBSERVAÇÃO
SUBTRANSITÓRIO	X''_d 20%	
TRANSITÓRIO	X'_d 30%	$X'_d > X''_d$
PERMANENTE	X_d 90%	$X_d > X'_d$

5 ciclos

0,5 - 1,2"

NOTA: Para máquina de rotor, com pólos não salientes.

$$X_d = X_s \text{ (reatância síncrona).}$$

A figura 10 mostra um típico oscilograma de um curto-circuito trifásico numa máquina síncrona, para uma fase com $(\alpha - \theta) = 0$, com as 3 envoltórias em evidência.

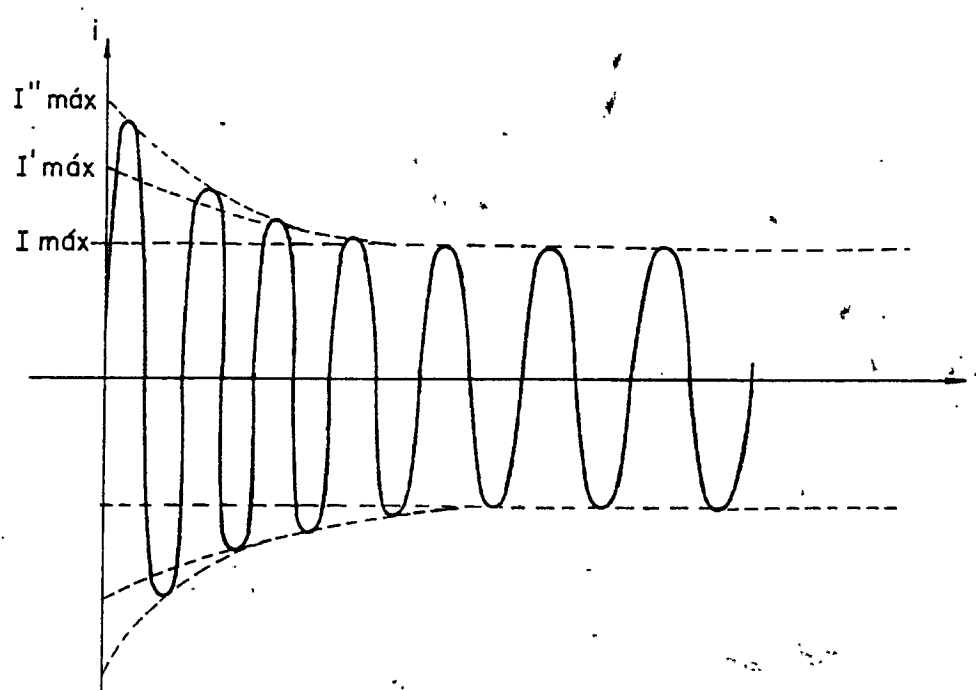


Figura 10 - Oscilograma típico.

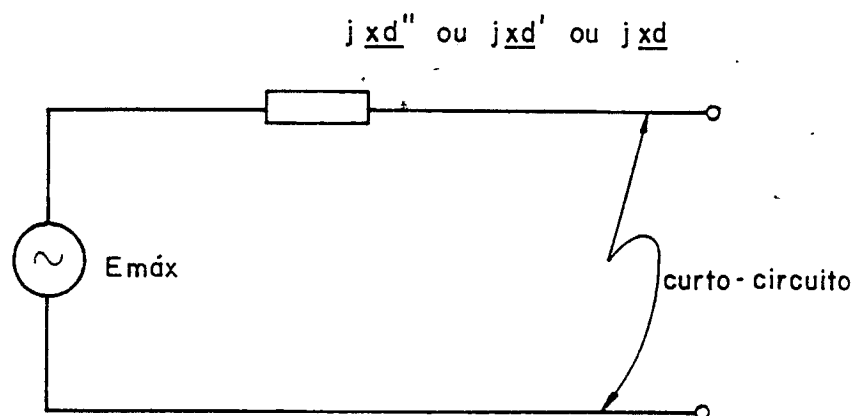


Figura 11 - Circuito equivalente, de uma máquina síncrona, desprezando-se R.

A figura 11 mostra o circuito equivalente. No período subtransitório a reatância é $X''d$ e a corrente de curto, máxima.

$$I''a_{m\acute{a}x} = \frac{Em\acute{a}x}{X''d}$$

No período transitório, a reatância vale $X'd$:

$$I'a_{m\acute{a}x} = \frac{Em\acute{a}x}{X'd}$$

No regime permanente:

$$Ia_{m\acute{a}x} = \frac{Em\acute{a}x}{Xd}$$

03. MÉTODO DE CÁLCULO DE CURTO

O cálculo se faz transformando o diagrama unifilar nos diagramas de impedâncias, convenientes a cada tipo de curto-circuito, ligando-se o ponto de curto-circuito à referência, efetuando-se os cálculos em pu, numa base escolhida previamente.

Exemplo: curto-circuito trifásico

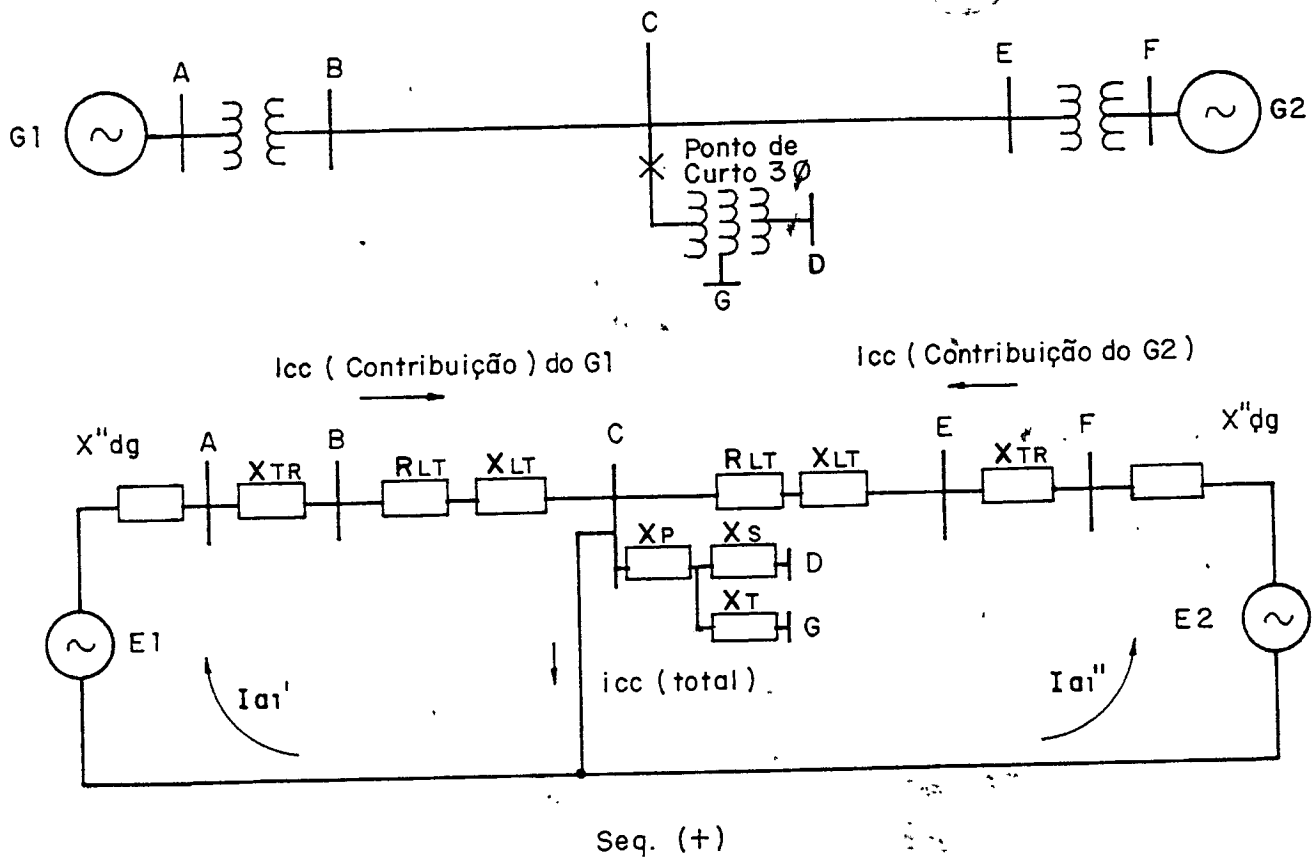


Figura 12

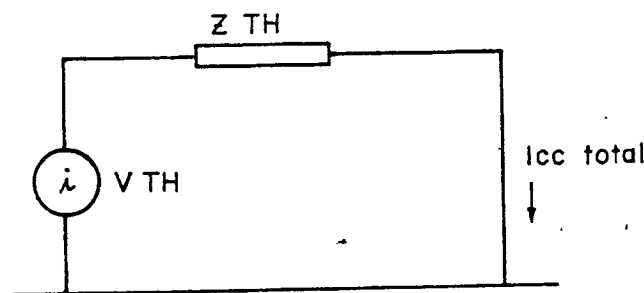
Na figura 12 está se utilizando X''_d , pois a intenção é calcular a máxima corrente de curto-circuito simétrico (sem o transitório DC, visto na página 05).

- Determina-se a impedância de Thévenin equivalente (Z_{TH}) do sistema, no ponto de curto-circuito, para isto curto-circuitando, no diagrama de impedâncias, todas as fem;
- A tensão do ponto de curto-circuito (pré-falta) é o gerador

equivalente de Thévenin (V_{TH});

- Determina-se a corrente total de curto, pelo equivalente, e as contribuições parciais;

- Nas contribuições parciais, somar as correntes de pré-falta (carga) para determinar as contribuições totais (na prática, para facilitar, a corrente de carga é desprezada).



Exemplo de cálculo de curto-circuito utilizando Thévenin equivalente no ponto de defeito. E dado o sistema, figura 13,

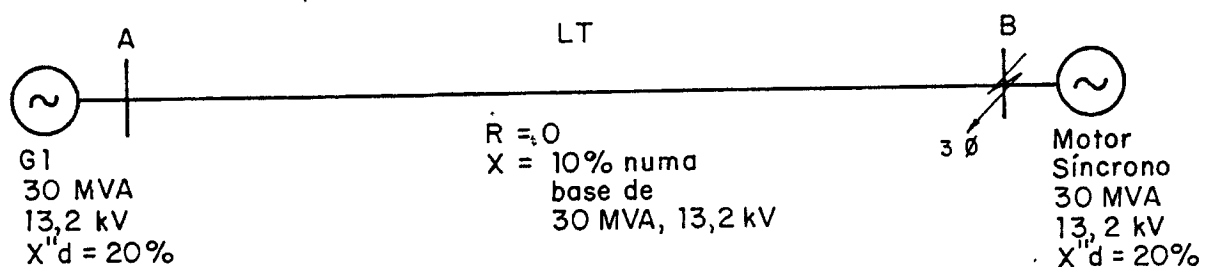
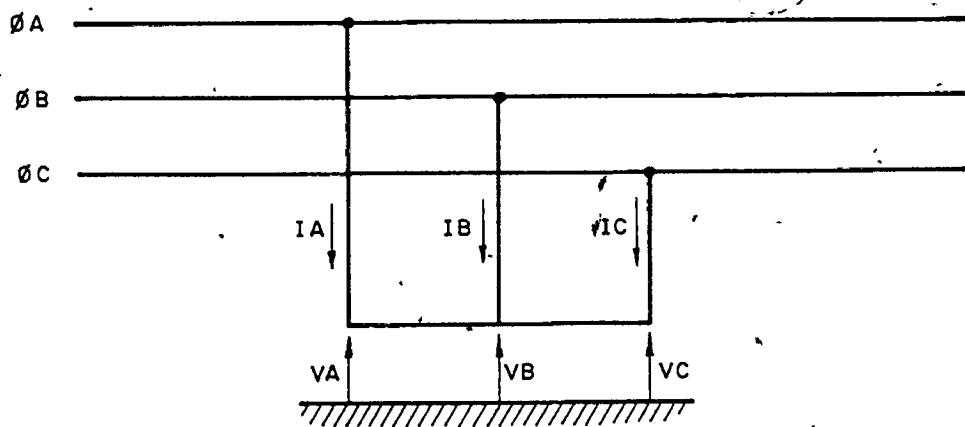


Figura 13

Calcular as condições subtransitórias de curto-circuito no gerador, no motor e no ponto de curto, para uma falta trifásica na barra B. O motor está consumindo 20MW, a 12,8kV e fator de potência = 0,8 indutivo.

Teoria do Cálculo de Curto-circuito Trifásico



$$|I_A| = |I_B| = |I_C| \quad \begin{aligned} I_A + I_B + I_C &= 0 \\ V_A = V_B = V_C &= 0 \end{aligned}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_A + I_B + I_C) = 0$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_A + a^2 I_B + a I_C) = 0$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_A + a I_B + a^2 I_C) = I_A$$

$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow \\ I_A & I_A \end{matrix}$

$$I_{a1} = I_A$$

$$I_{b1} = I_B$$

$$I_{c1} = I_C$$

$$E_a = V_{a1} + Z_1 \cdot I_{a1}$$

$$0 = V_{a2} + Z_2 \cdot I_{a2}$$

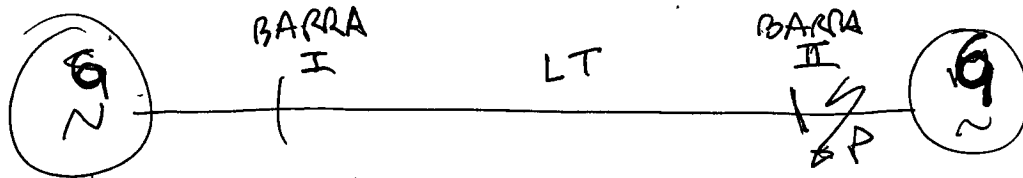
$$0 = V_{a0} + Z_0 \cdot I_{a0}$$

$$V_{a1} = V_A$$

$$V_{b1} = V_B$$

$$V_{c1} = V_C$$

$$I_{a1} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}}$$



sistema I

$$X_1 = X_2 = j 0,3 \mu$$

$$X_0 = j 0,18 \mu$$

$$X_1 = X_2 = j 0,5 \mu$$

$$X_0 = j 0,7 \mu$$

sistema II

$$X_1 = X_2 = j 0,2 \mu$$

$$X_0 = j 0,18 \mu$$

Nota

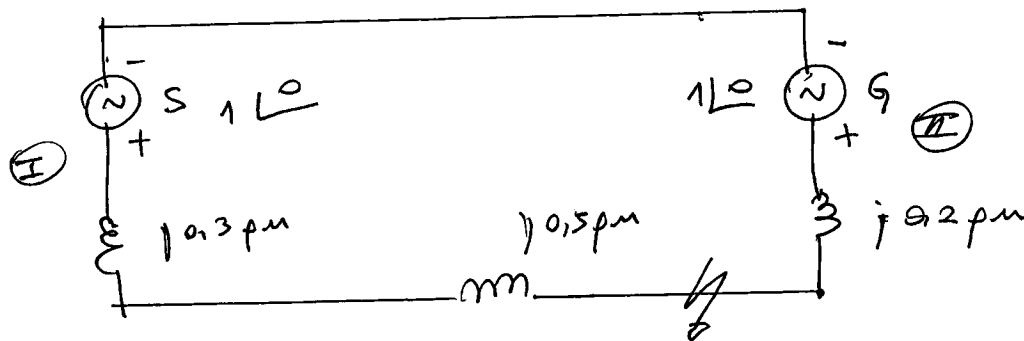
$$S = 100 \text{ MVA}$$

$$V_b = 13,8 \text{ kV}$$

$$I_b = \frac{S_b}{V_b \sqrt{3}} = 418,368 \text{ A}$$

$$V_{th} = 1 \angle 0^\circ \mu$$

	I	LT	II	
SL (MVA)	100	100	100	
Vb (kV)	13,8	13,8	13,8	
Ib (A)	418,368 A	180 A	1,8 A	$S_b / \sqrt{3} V_b$
Zb	4183 A	418 A	4183 A	V_b^2 / S_b
Zpu ⁺	j 0,3	j 0,5	j 0,2	$Z_{pu} \left(\frac{V_{bV}}{V_{bU}} \right)^2 \frac{S_{bU}}{S_{bV}}$
Zpu ⁻	j 0,3	j 0,5	j 0,2	
Zpu ⁰	j 0,18	j 0,7	j 0,18	



$$V_f = \frac{12,8}{13,2} = 0,9697 \angle 0^\circ \text{ pu na barra B antes do curto (VTH)}$$

$$\frac{20\text{MW}}{0,8} = 25\text{MVA (carga)}$$

$$\frac{25\text{MVA}}{30\text{MVA (base)}} = 0,8333\text{pu de potência aparente, na carga}$$

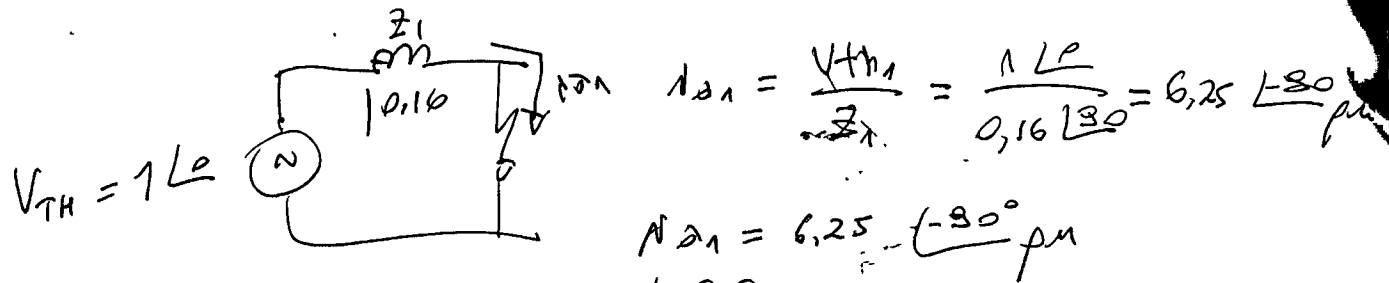
$$\text{Arc cos}(0,8) = 36,87^\circ$$

$$|i| = \frac{P}{V} = \frac{0,8333}{0,9697} = 0,8594\text{pu de corrente de carga}$$

$$\text{VTH} = 0,9697 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$i_c = 0,8594 \angle -36,87^\circ \text{ pu (indutivo)}$$

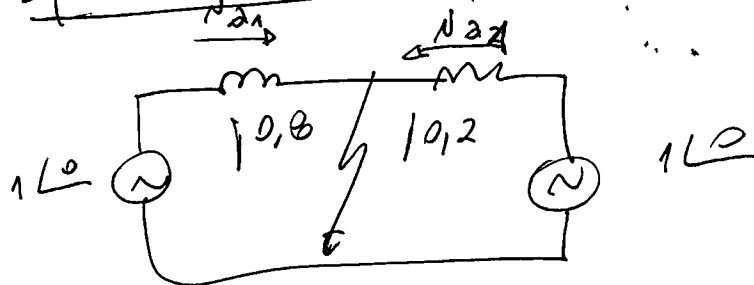
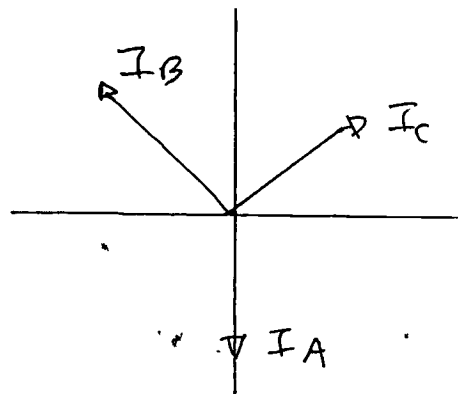
$$Z_{TH} = Z_1 // Z_2 \quad j0,8 // j0,2$$



$$N_{b1} = \alpha^2 N_{a1} = 1\angle -120 \cdot 6,25\angle -90$$

$$N_{c1} = 6,25\angle 30 \mu A$$

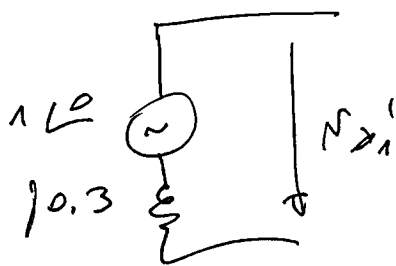
parte de I y II al cc



$$N_{a1}' = \frac{1\angle 0}{j0,8\angle 90} = 1,25\angle -90$$

$$N_{a2}'' = \frac{1\angle 0}{j0,2\angle 90} = 5\angle -90$$

tension en sistema I en cc



$$N_{a1}' = N_{TH} - (N_{a1}' \cdot 0,3)$$

$$N_{a1}' = 1\angle 0 - (1,25\angle -90 \cdot 0,3\angle 90) = 0,626\angle 0 \mu A$$

Diagrama Vectorial

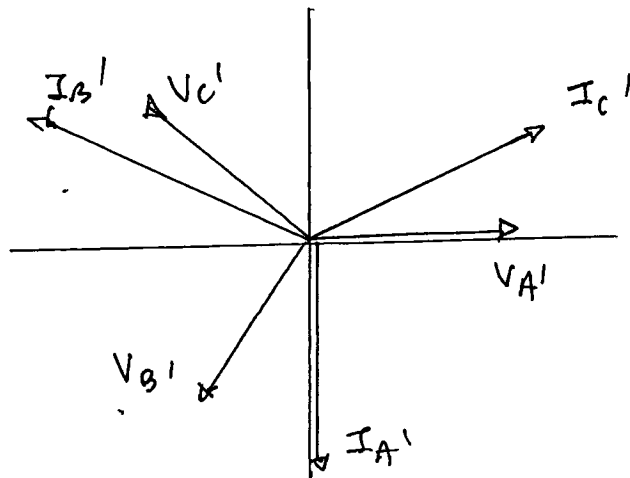


Diagrama de Impedâncias (Base de 30MVA, 13,2kV)

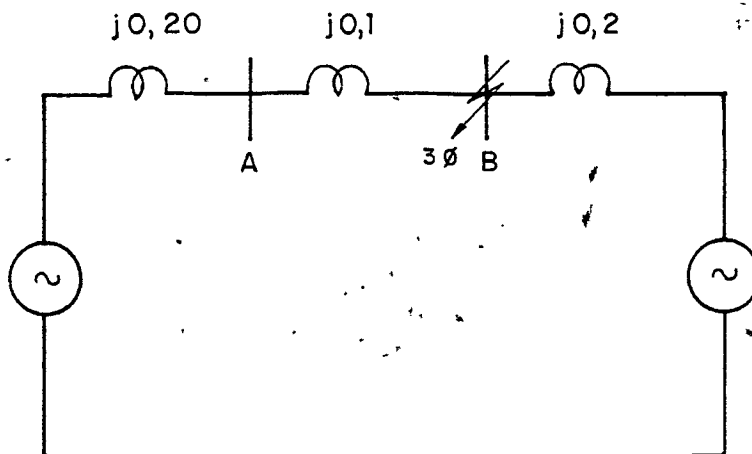


Figura 14

VTH equivalente em B = Vf

$$V_{TH} = 0,9697 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

ZTH equivalente em B:

$$I_b = \frac{30000}{\sqrt{3} \cdot 13,2} = 1312,2 \text{ A}$$

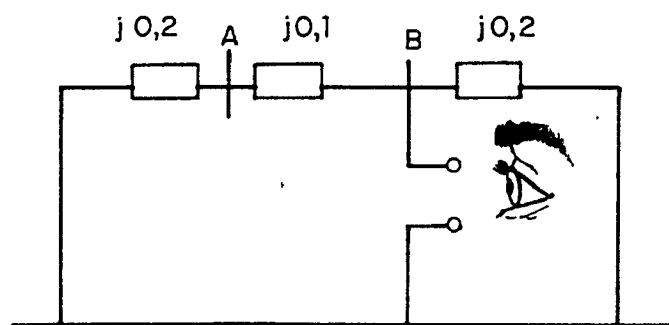
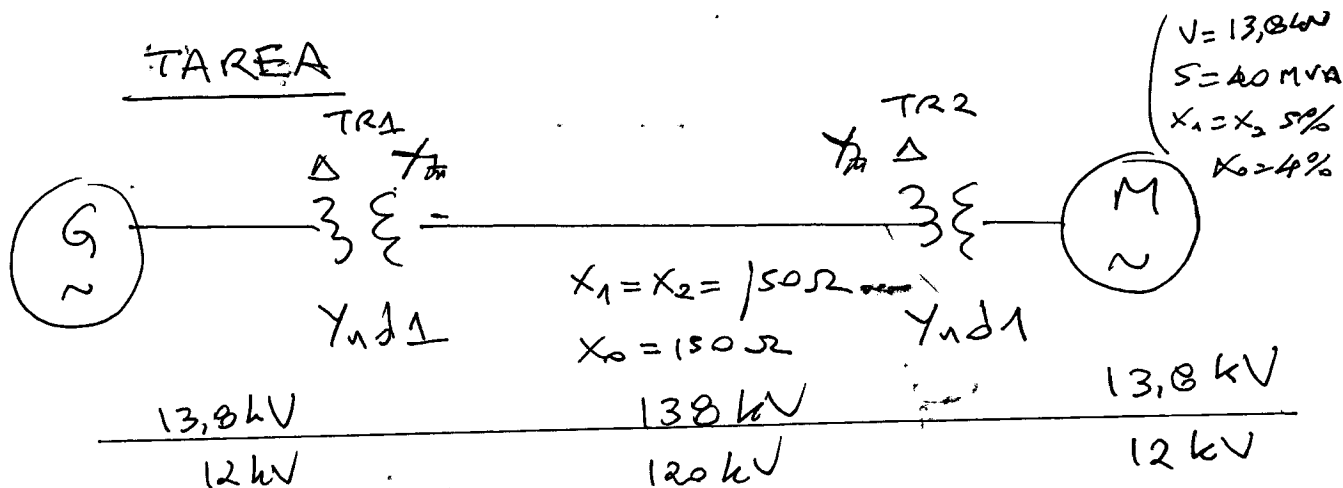


Figura 15

$$Z_{TH} = \frac{j0,3 \times j0,2}{j0,3 + j0,2} = \frac{-0,06}{j0,5} = j0,12 \text{ pu} \Rightarrow Z_{TH} = j0,12 \text{ pu}$$

TAREA



* Calcular todos los CC.

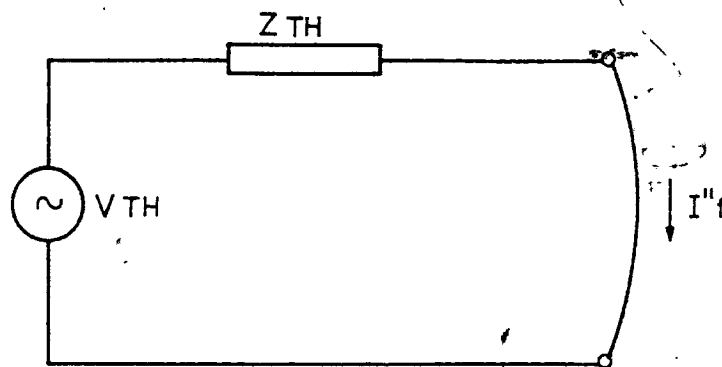


Figura 16

$$I_{a1} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}} = \frac{0,9697 \angle 0^\circ}{0,12 \angle 90^\circ} = 8,080 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

ou

$$I_A = 10602,5 \angle -90^\circ \text{ A}; \quad I_B = 10602,5 \angle 150^\circ \text{ A}; \quad I_C = 10602,5 \angle 30^\circ \text{ A}$$

Contribuições parciais

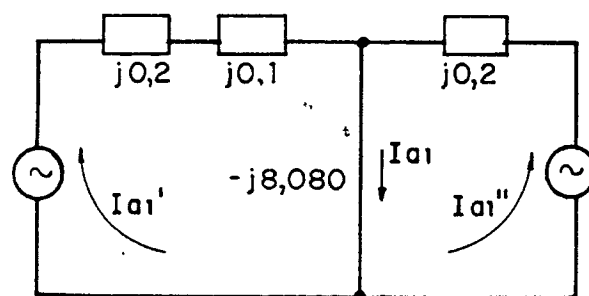
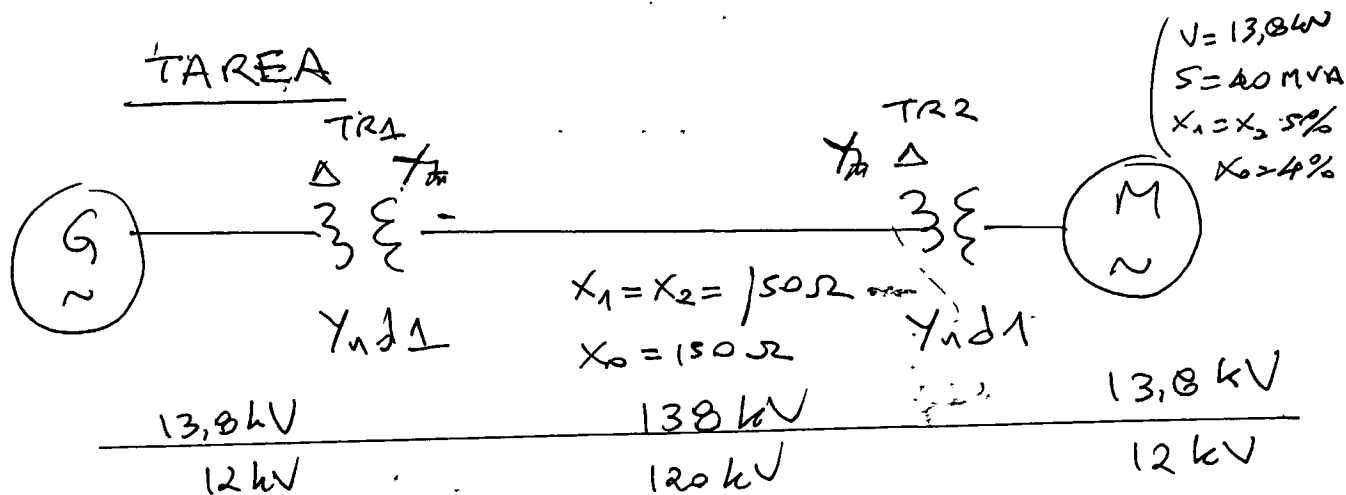


Figura 17

$$I_{a1}' = -j8,080 \times \frac{0,2}{0,3 + 0,2} = -j3,232 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 4241 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_{a1}'' = -j8,080 \times \frac{0,3}{0,2 + 0,3} = -j4,848 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 6361,5 \angle -90^\circ \text{ A}$$

TAREA



$$\begin{cases} V = 13,8 \text{ kV} \\ S = 50 \text{ MVA} \\ X_1 = X_2 = 10\% \\ X_0 = 5\% \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{TR1} \\ V = 13,8 / 138 \text{ kV} \\ S = 60 \text{ MVA} \\ X_1 = X_2 = X_0 = 10,5\% \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{TR2} \\ V = 138 / 13,8 \text{ kV} \\ S = 60 \text{ MVA} \\ X_1 = X_2 = X_0 = 10,3\% \end{cases}$$

* Calcular todos los CC.

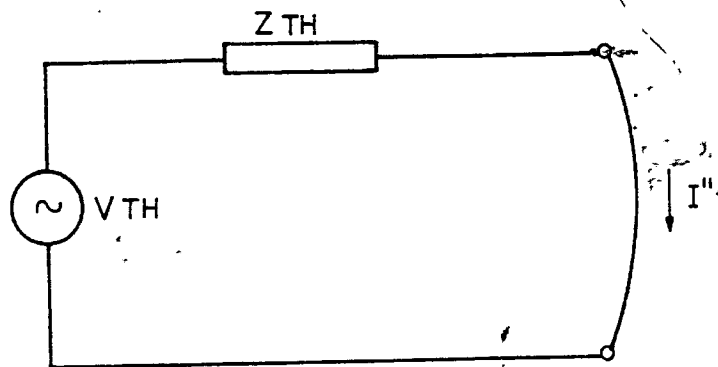


Figura 16

$$I_{a1} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}} = \frac{0,9697 \angle 0^\circ}{0,12 \angle 90^\circ} = 8,080 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

ou

$$I_A = 10602,5 \angle -90^\circ \text{ A}; \quad I_B = 10602,5 \angle 150^\circ \text{ A}; \quad I_C = 10602,5 \angle 30^\circ \text{ A}$$

Contribuições parciais

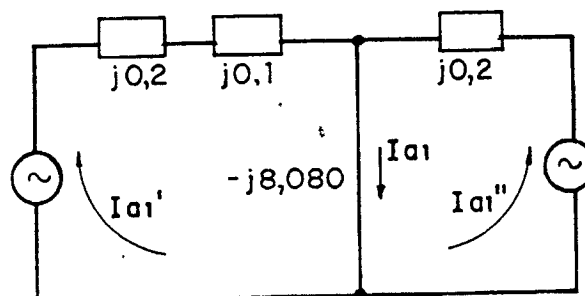


Figura 17

$$I_{a1}' = -j8,080 \times \frac{0,2}{0,3 + 0,2} = -j3,232 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 4241 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_{a1}'' = -j8,080 \times \frac{0,3}{0,2 + 0,3} = -j4,848 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 6361,5 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Contribuições totais considerando a corrente de carga (I_c)

$$I_c = 0,8594 \angle -36,87^\circ = 0,6875 - j0,5156 \text{ pu}$$

$$I_{A'} = I_{A1'} + I_c = 0,6875 - j0,5156 - j5,232$$

$$I_{A'} = 0,6875 - j5,7476 = 5,810 \angle -79,61^\circ$$

$$I_{A''} = I_{A1''} - I_c = j4,848 - 0,6875 + j0,5156$$

$$I_{A''} = -0,6875 - j4,3324 = 4,387 \angle -99,01^\circ$$

Cálculo da corrente total (I_A)

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A'} + I_{A''} = 5,810 \angle -79,61^\circ + 4,387 \angle -99,01^\circ = \\ &= 8,080 \angle -90^\circ \text{ pu} \quad \text{ou} \quad 10602,5 \angle -90^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Exercício Proposto

O sistema mostrado abaixo está fornecendo 60000kVA a 12,5kV, fator de potência 0,8 adiantado, para um grande sistema que pode ser considerado um barramento infinito.

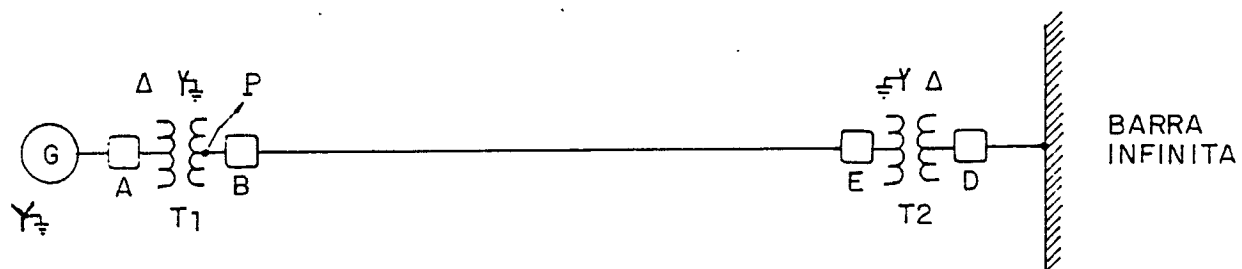


Figura 18

Gerador: 60MVA
12,7kV
 $X''_d = 0,20\text{pu}$

Cada trafo: 75000kVA (3Ø)
13,8 Δ /69Y kV
 $x = 8\%$

Linha: $R = 0$
 $x = j10 \text{ Ohms}$

Ocorrendo um curto-circuito trifásico em P, calcular as correntes subtransitórias (inicial), através dos disjuntores A e B.

- a) Escolher uma base para o estudo;
Por exemplo:

$$P_{\text{base}} = 60\text{MVA}$$

$$V_{\text{base}} = 12,7\text{kV no circuito do gerador}$$

- b) Calcular as impedâncias (em pu) na base escolhida;
c) Montar o diagrama de impedâncias;
d) Calcular as correntes de curto-circuito em pu;
e) Calcular as correntes em ampères.

Curtos-circuitos Fase-terra

Teoria

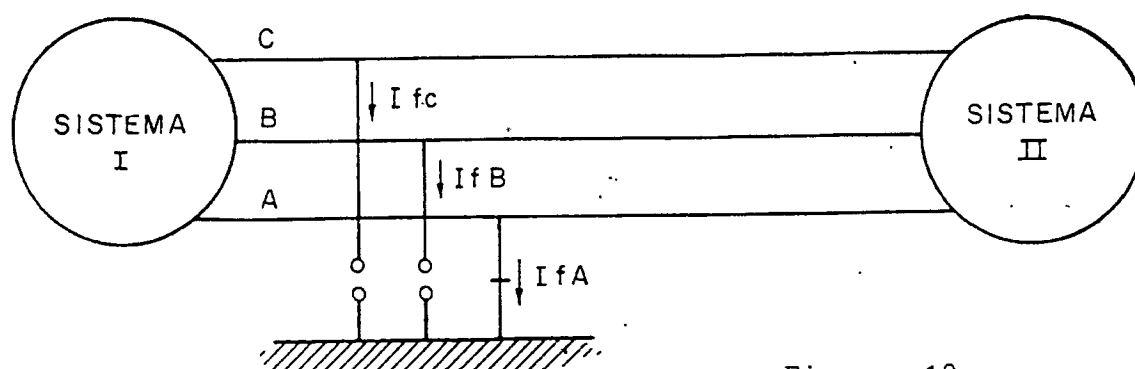


Figura 19

Seja I_{fA} corrente de curto-circuito total para um curto fase-terra na fase A.

$$I_{fA} \neq 0$$

$$I_{fB} = 0$$

$$I_{fC} = 0$$

Chamemos:

$$I_{fA} = I_A$$

$$I_{fB} = I_B$$

$$I_{fC} = I_C$$

para facilitar a nomenclatura.

Da teoria de componentes simétricas:

$$\begin{vmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$I_{a0} = \frac{I_A}{3}$$

$$I_{a1} = \frac{I_A}{3}$$

$$I_{a2} = \frac{I_A}{3}$$

Isto é: $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$.

As tensões fase-terra são, para o ponto em curto-circuito,

$$V_a = 0$$

$$V_b \neq 0$$

$$V_c \neq 0$$

Consideremos agora, no ponto em curto-circuito, o Thévenin equivalente, para a sequência (+), sequência (-) e sequência (0).

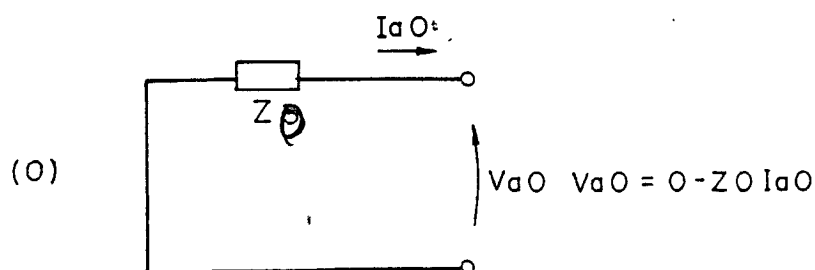
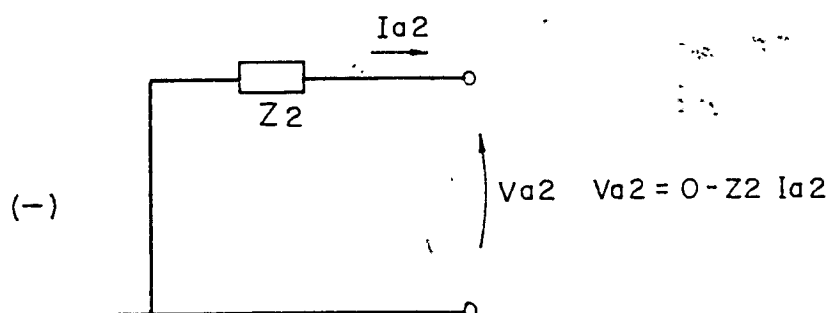
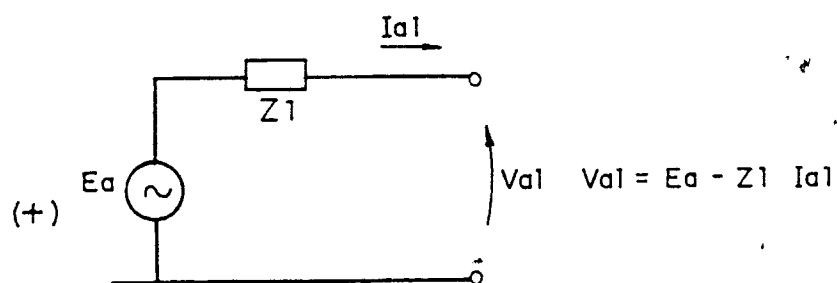


Figura 20

Como $I_{a0} = I_{a2} = I_{a1}$, temos:

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

As tensões fase-terra são, para o ponto em curto-circuito,

$$V_a = 0$$

$$V_b \neq 0$$

$$V_c \neq 0$$

Consideremos agora, no ponto em curto-circuito, o Thévenin equivalente, para a sequência (+), sequência (-) e sequência (0).

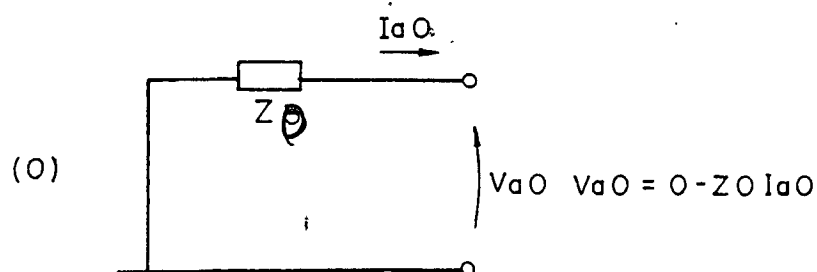
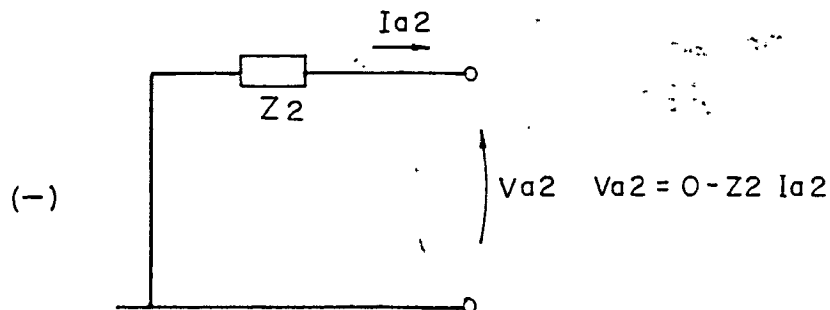
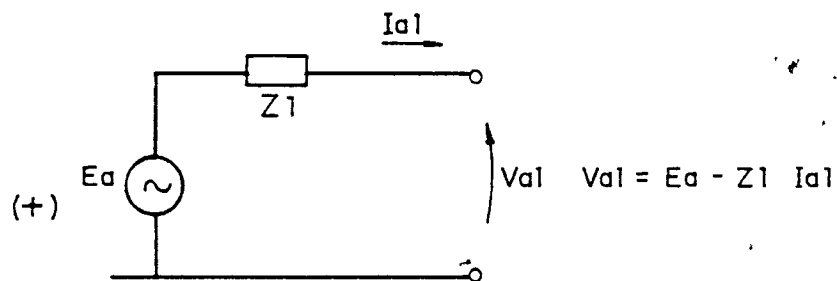


Figura 20

Como $I_{a0} = I_{a2} = I_{a1}$, temos:

$$V_{a1} = E_a - Z_1 I_{a1}$$

$$V_{a2} = 0 - Z_2 \cdot I_{a1}$$

$$V_{a0} = 0 - Z_0 \cdot I_{a1}$$

$$\text{Como } V_A = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0$$

Temos:

$$E_a - Z_1 \cdot I_{a1} - Z_2 \cdot I_{a1} - Z_0 \cdot I_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$\text{Lembrando que: } I_{a0} = I_{a2} = I_{a1}$$

$$\text{Donde: } I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_A = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Onde: E_a = VTH de seqüência (+) (pré-falta) no ponto em curto-circuito;

Z_1 = ZTH de seqüência (+) no ponto;

Z_2 = ZTH de seqüência (-) no ponto;

Z_0 = ZTH de seqüência (0) no ponto.

Conhecendo-se $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$, pode-se calcular as contribuições parciais para cada seqüência e depois compô-las (como para faltas trifásicas, pode-se desprezar ou não as correntes de pré-falta).

Conhecendo-se as componentes simétricas da fase A, determinam-se as componentes das demais fases, após o que pode-se compô-las para determinar os valores das fases B e C.

Do que foi visto, pode-se montar o circuito equivalente para o curto fase-terra (na fase A):

gerador
ideal

$$Z_1 = Z_2 = X_s$$

$$Z_0 = 3R$$



$$I_A = \frac{3E_a}{j2X_s + 3R}$$

$$\text{linea } Z_1 = Z_2 = X_L$$

$$\text{ideal } Z_0 = 4X_L$$

$$I_A = \frac{E_a}{2X_L}$$

$$\text{trafo ideal } Z_1 = Z_2 = Z_0 = X_T$$

$$I_A = \frac{E_a}{X_T}$$



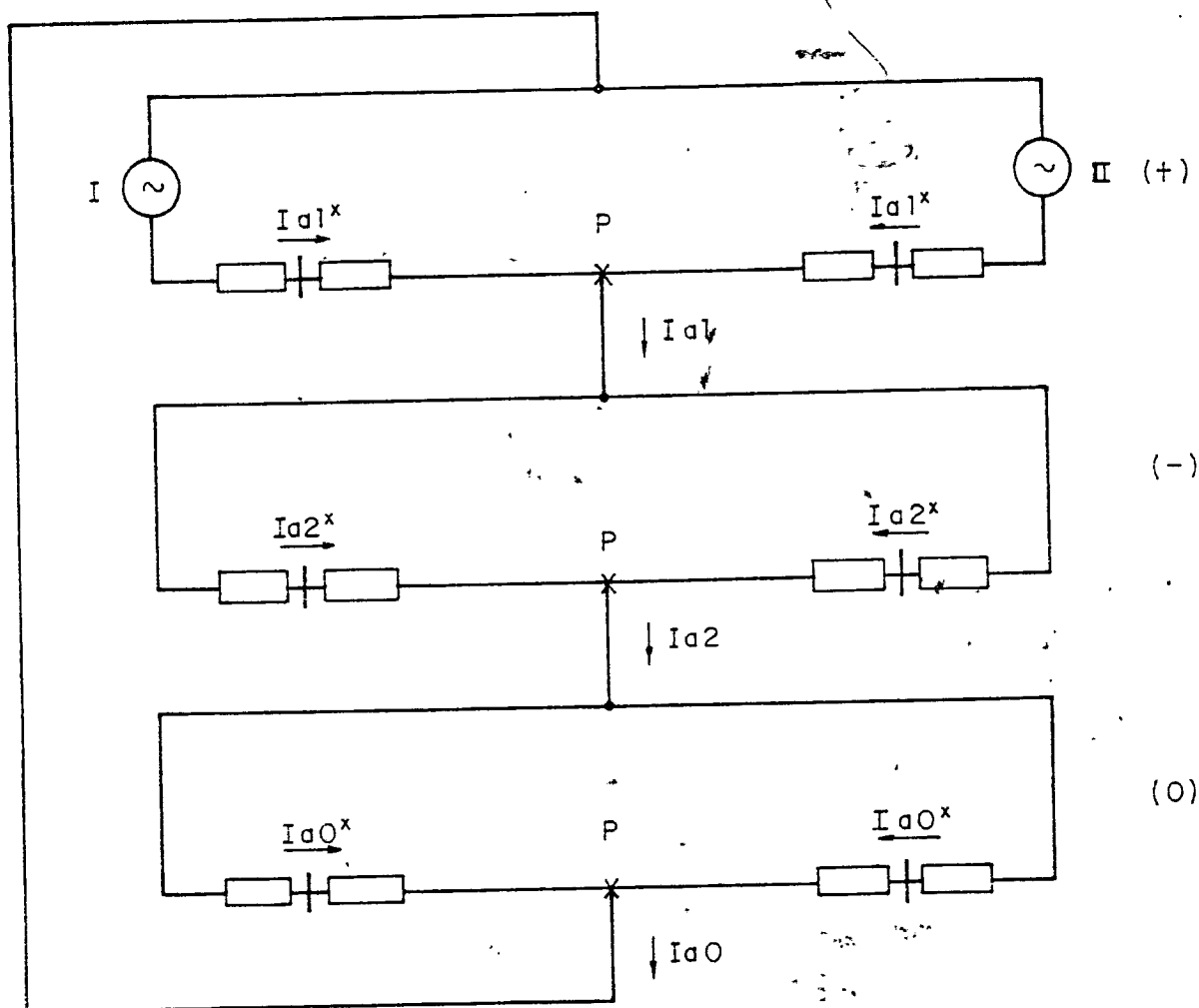


Figura 21

Nota-se na figura acima que: $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$

A contribuição do sistema I, na fase em curto, será:

$$I_A^x = I_{a0}^x + I_{a1}^x + I_{a2}^x$$

Para o sistema II, na fase em curto:

$$I_A^{xx} = I_{a0}^{xx} + I_{a1}^{xx} + I_{a2}^{xx}$$

Seqüência Prática para Cálculo:

- a) Estabelecer as bases para o estudo;
- b) Determinar o diagrama de impedâncias de seqüência (+), em pu, na base estabelecida;
- c) Idem para a seqüência (-);
- d) Idem para a seqüência (0);
- e) Identificar o ponto em curto-circuito, em cada um dos diagramas;
- f) Interligar os diagramas:
 - Ponto em curto, da seqüência (+) para a referência de seqüência (-);
 - Ponto em curto, da seqüência (-) para a referência de seqüência (0);
 - Ponto em curto, da seqüência (0) para a referência de seqüência (+).

NOTA: Esta interligação é apenas para visualização, antes da determinação dos Thévenin.

- g) Determinar os Thévenin equivalentes para cada seqüência:

V_{TH} , Z_{TH1} para a seqüência (+);

Z_{TH2} para a seqüência (-);

Z_{TH0} para a seqüência (0)

e interligar os diagramas:

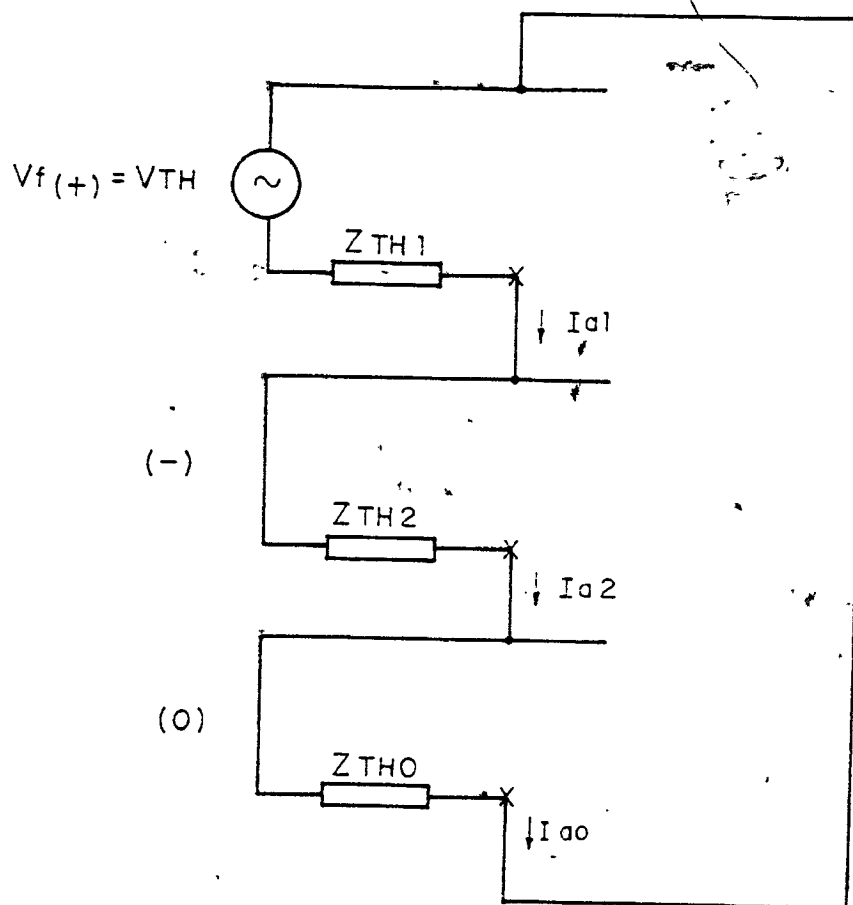


Figura 22

h) Determinar $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$

$$I_{a1} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH1} + Z_{TH2} + Z_{TH0}}$$

$$I_A \text{ (total)} = \frac{3V_{TH}}{Z_{TH1} + Z_{TH2} + Z_{TH0}}$$

i) Voltar aos diagramas interligados (item f) e fazer os divisores de corrente, para cada seqüência, nos ramos que interessam;

j) Para cada ramo, tem-se então $Ia1^x$, $Ia2^x$, $Ia0^x$ (contribuições), que, compostas, dão a corrente de curto na fase em curto;

k) Para cada ponto do sistema, pode-se então determinar:

$Va0$ = Tensão de sequência (0) no ponto, calculado no diagrama de sequência (0), da referência ao ponto;

$Va1$ = Idem, sequência (+);

$Va2$ = Idem, sequência (0);

E compor $V_A = Va0 + Va1 + Va2$, para se determinar a tensão da fase em falta, no ponto desejado;

l) Com as componentes da fase A (em curto), pode-se determinar as componentes das demais fases, lembrando que:

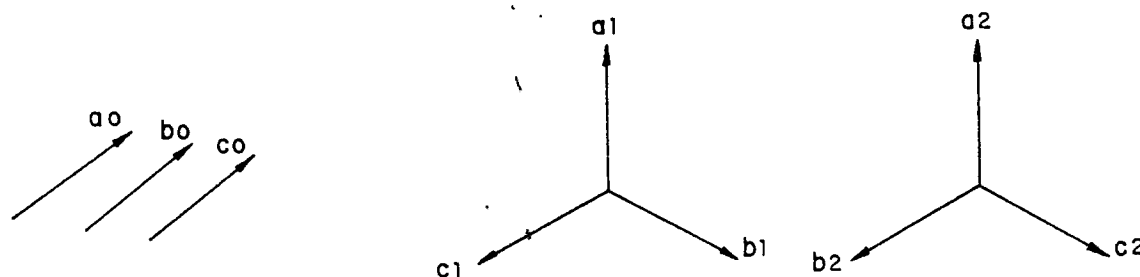


Figura 25

m) Lembrar também que as correntes de neutro, ou para terra, podem ser calculadas:

$$I_n = 3I_0$$

para o ramo ou trecho desejado.

Exemplo:

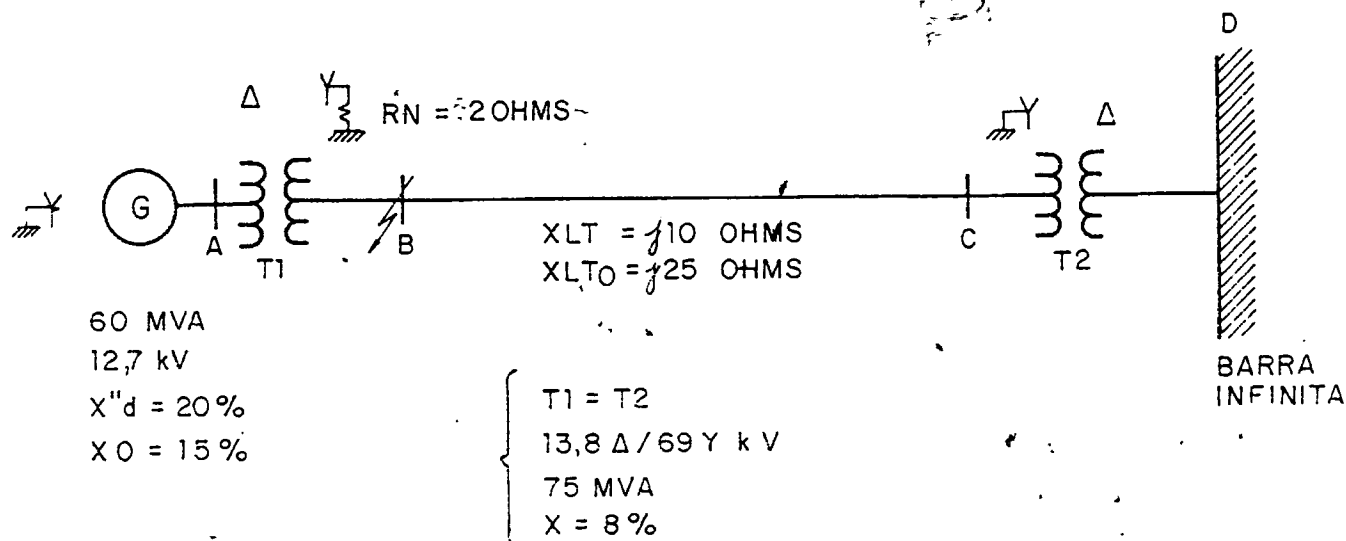


Figura 24

01. Calcular as correntes subtransitórias para um curto-circuito na fase A e terra na barra B;
02. Calcular as contribuições vindas do T1 e do T2 (através da L.T.).

NOTA: Tensão de pré-falta em B = 69kV
Desprezar a carga.

- a) Vamos escolher uma base de 100MVA e 12,7kV no circuito do gerador;
- b) Diagrama de impedância da sequência (+):

Gerador:

$$X''d = 0,20 \times \left(\frac{12,7}{12,7} \right)^2 \times \left(\frac{100}{60} \right) = 0,5555 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0,15 \times (1) \times (1,666) = 0,2500 \text{ pu}$$

Transformador:

$$X = 0,08 \times \left(\frac{13,8}{12,7}\right)^2 \times \left(\frac{100}{75}\right) = 0,1259 \text{ pu}$$

$$R_N = \frac{Z_F}{Z_b}$$

$$R_N = \frac{2}{63,5^2 / 100} = 0,0496 \text{ pu}$$

NOTA: 63,5kV é o Vbase no lado da alta.

$$X_{LT} = \frac{10}{(63,5)^2 / 100} = 0,2480 \text{ pu}$$

$$X_{LT(0)} = \frac{25}{(63,5)^2 / 100} = 0,620 \text{ pu}$$

Barra infinita: $X = 0$

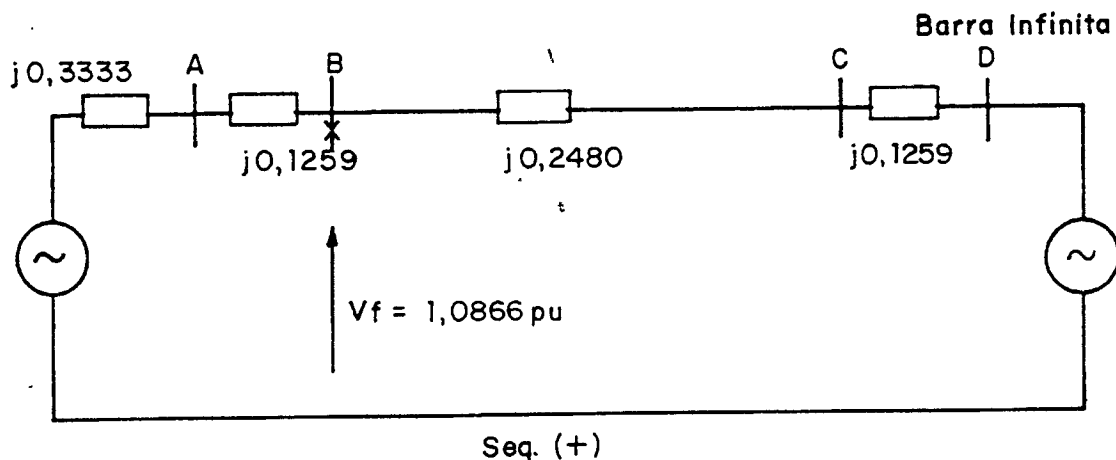


Figura 25

$$V_f = \frac{69}{63,5} = 1,0866 \text{ pu}$$

c) Diagrama de seqüência (-)

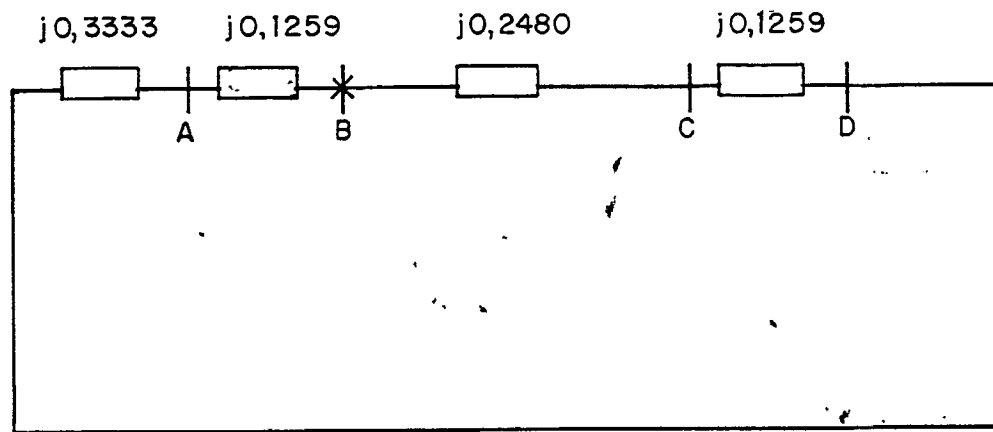


Figura 26

d) Seqüência (0)

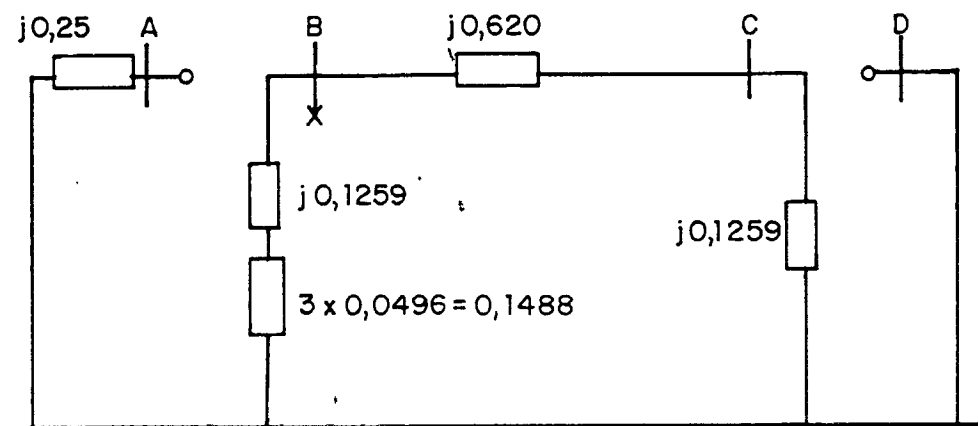


Figura 27

e)

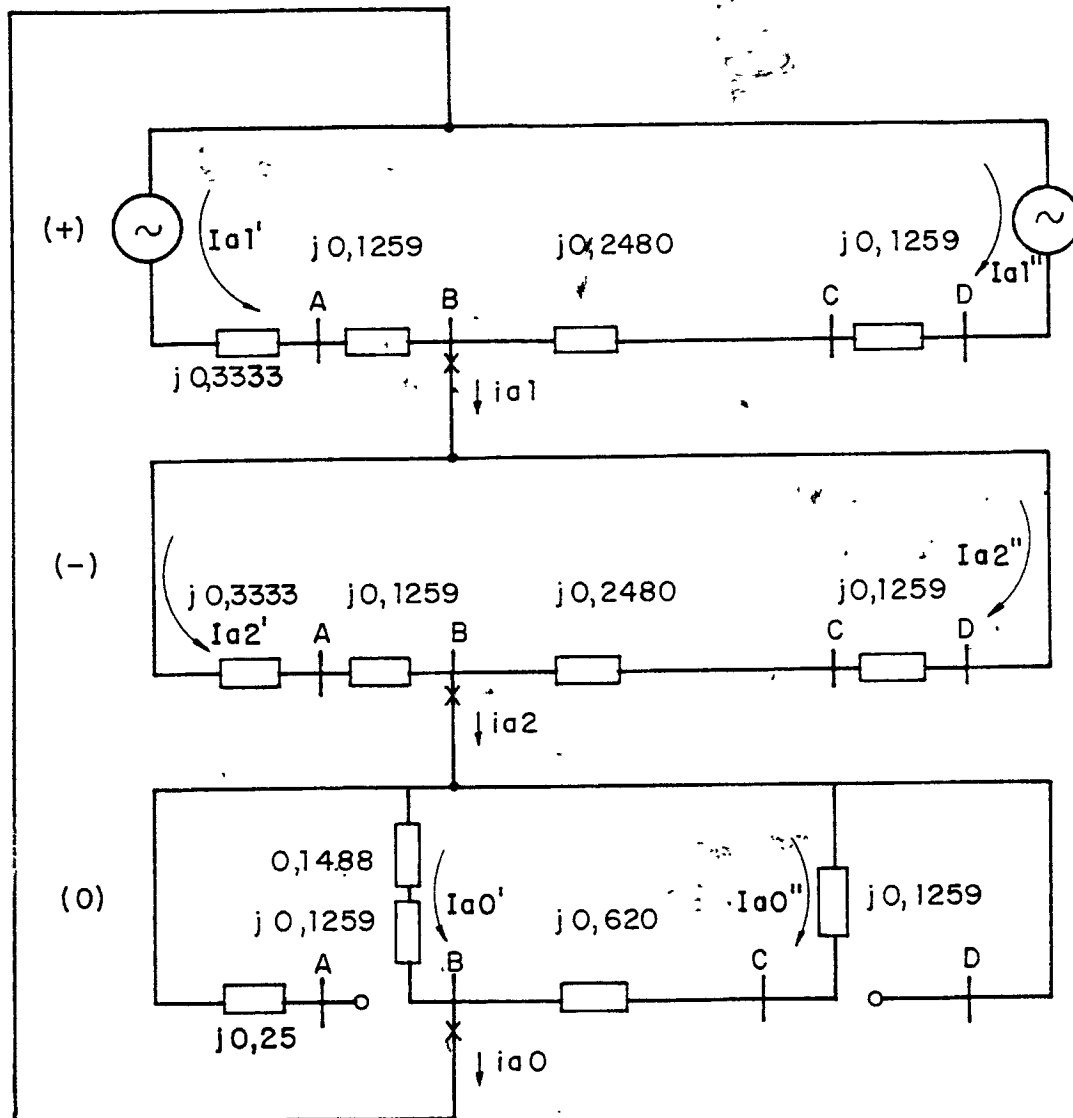


Figura 28

f) Sequência (+)

$$Z_{TH(+)} = \frac{j0,4592 \times j0,3739}{j0,4592 + j0,3739} = j0,2061$$

$$j0,3333 + j0,1259 = j0,4592$$

$$j0,2480 + j0,1259 = j0,3739$$

$$V_{TH+} = 1,0866 \text{ pu}$$

Seqüência (-)

$$Z_{TH}(-) = j0,2061$$

Seqüência (0)

$$j0,620 + j0,1259 = j0,7459$$

$$Z_{TH}(0) = \frac{(0,1488 + j0,1259) \cdot (j0,7459)}{(0,1488 + j0,1259 + j0,7459)}$$

$$Z_{TH}(0) = \frac{-0,0939 + j0,1110}{0,1488 + j0,8718} = \frac{0,14539 \angle 130,23^\circ}{0,8844 \angle 80,31^\circ}$$

$$Z_{TH}(0) = 0,1644 \angle 49,9^\circ = 0,1058 + j0,1258$$

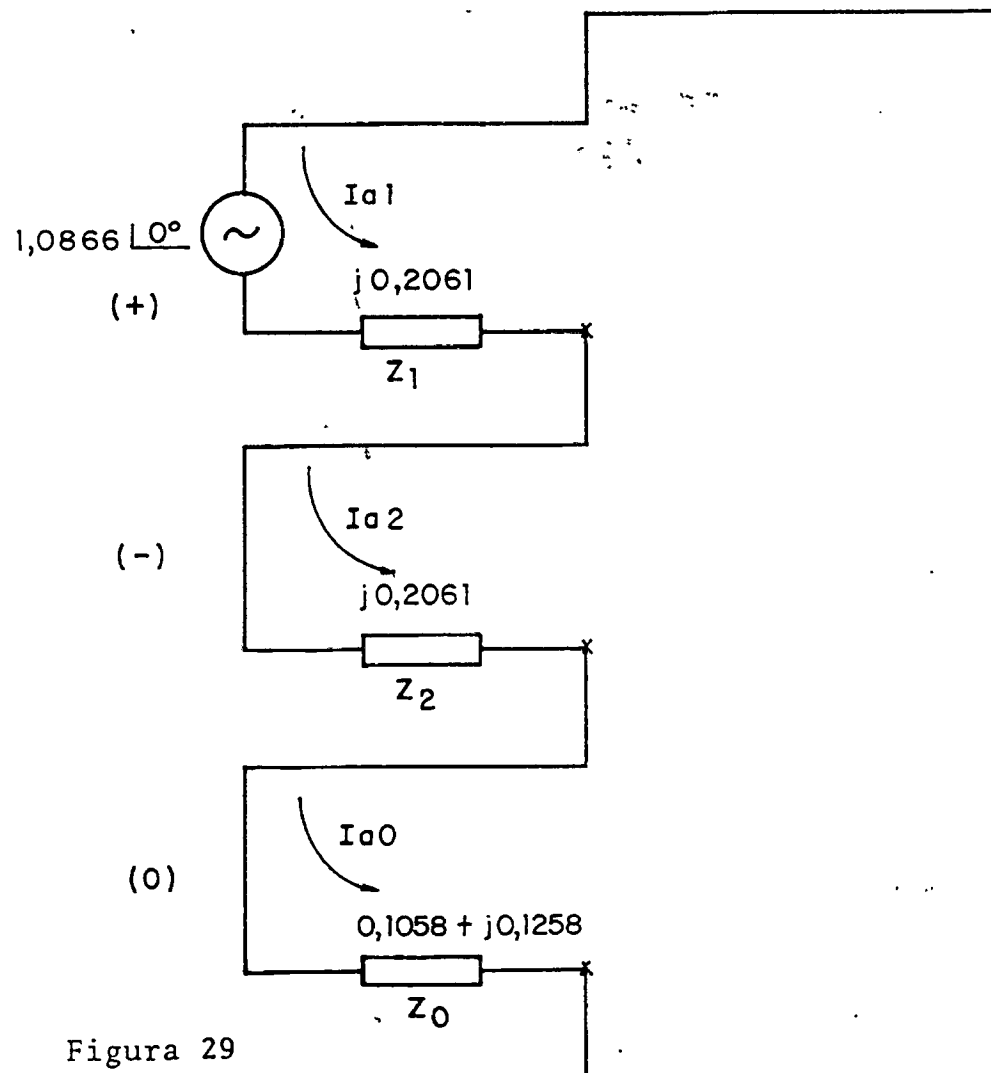


Figura 29

$$g) \quad I_{a1} = \frac{1,0866}{0,1058 + j0,2061 + j0,2061 + j0,1258}$$

$$I_{a1} = \frac{1,0866}{0,1058 + j0,538}$$

$$I_{a1} = \frac{1,0866 \angle 0^\circ}{0,5483 \angle 78,9^\circ} = 1,98 \angle -78,9^\circ$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = 1,98 \angle -78,9^\circ \text{ pu}$$

$$I_A = 3 \times 1,98 \angle -78,9^\circ = 5,94 \angle -78,9^\circ \text{ pu}$$

h) Seqüência (+)

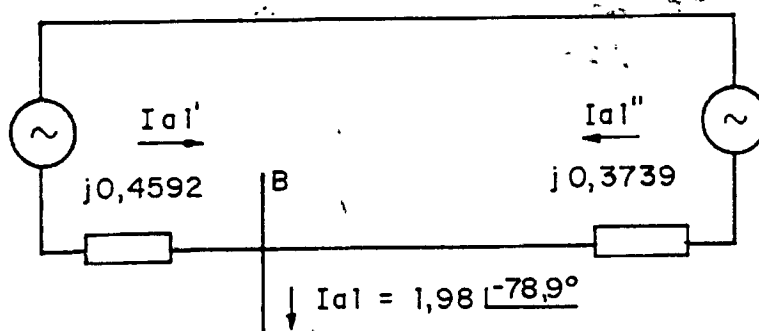


Figura 30

$$I_{a1'} = 1,980 \angle -78,9^\circ \times \frac{0,3739}{(0,3739 + 0,4592)} =$$

$$= 0,888 \angle -78,9^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a1}' = 0,888 \angle -78,9^\circ \text{ pu (Contribuição de sequência (+) do lado do TR1)}$$

$$I_{a1}'' = 1,980 \angle -78,9^\circ - 0,888 \angle -78,9^\circ = 1,092 \angle -78,9^\circ \text{ pu}$$

(Contribuição que vem da LT, sequência (+))

Sequência (-)

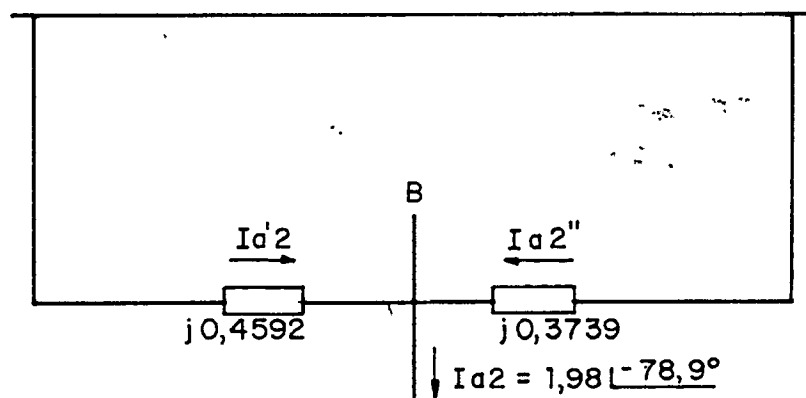


Figura 31

$$I_{a2}' = 0,888 \angle -78,9^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2}'' = 1,092 \angle -78,9^\circ \text{ pu}$$

Seqüência (0)

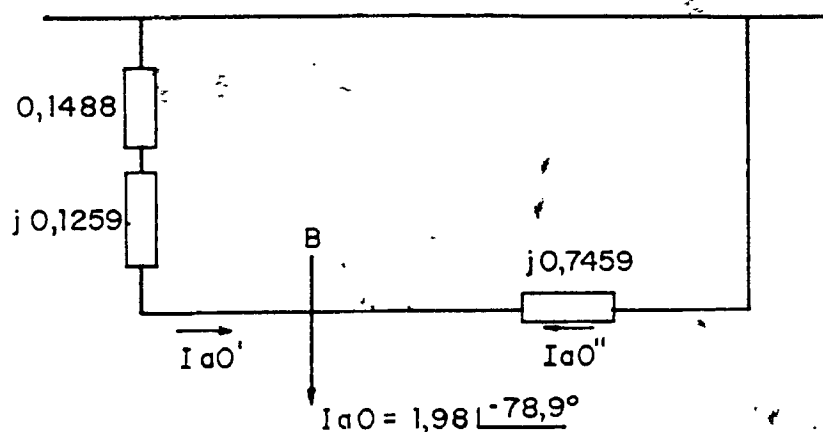


Figura 32

$$I_{a0'} = 1,98 \angle -78,9^\circ \times \frac{j0,7459}{(0,1488 + j0,1259 + j0,7459)}$$

$$I_{a0'} = 1,98 \angle -78,9^\circ \times \frac{0,7459 \angle 90^\circ}{0,8844 \angle 80,3^\circ} = 1,67 \angle -69,2^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0'} = 1,67 \angle -69,2^\circ \text{ pu}$$

Contribuição de seqüência (0), do lado do TR1.

$$I_{a0''} = 1,98 \angle -78,9^\circ \times \frac{0,1488 + j0,1259}{0,1488 + j0,8718}$$

$$I_{a0''} = 1,98 \angle -78,9^\circ \times \frac{0,1949 \angle 40,2^\circ}{0,8844 \angle 80,3^\circ} = 0,4363 \angle -119^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0''} = 0,4363 \angle -119^\circ \text{ pu (Contribuição de seqüência (0) do TR2, através da LT).}$$

i) Composição das correntes

$$IA' = ia0' + ia1' + ia2'$$

$$IA' = 1,67 \angle -69,2^\circ + 0,888 \angle -78,9^\circ + 0,888 \angle -78,9^\circ$$

$$IA' = 0,5930 - j1,5612 + 0,1709 - j0,8714 + 0,1709 - j0,8714$$

$$IA' = 0,9348 - j3,304 = 3,434 \angle -74,2^\circ \text{ pu}$$

$$IA' = 3,434 \angle -74,2^\circ \text{ pu}$$

Corrente na fase em falta, vinda do TR1, desprezando-se a carga.

$$IA'' = Ia0'' + Ia1'' + Ia2''$$

$$IA'' = 0,4363 \angle -119^\circ + 1,092 \angle -78,9^\circ + 1,092 \angle -78,9^\circ$$

$$IA'' = 0,4363 \angle -119^\circ + 2,184 \angle -78,9^\circ$$

$$IA'' = 0,2115 - j0,3816 + 0,4205 - j2,1431$$

$$IA'' = 0,209 - j2,5247$$

$$IA'' = 2,533 \angle -85,3^\circ \text{ pu}$$

Corrente na fase em falta, vinda através da LT.

Diagrama Elucidativo

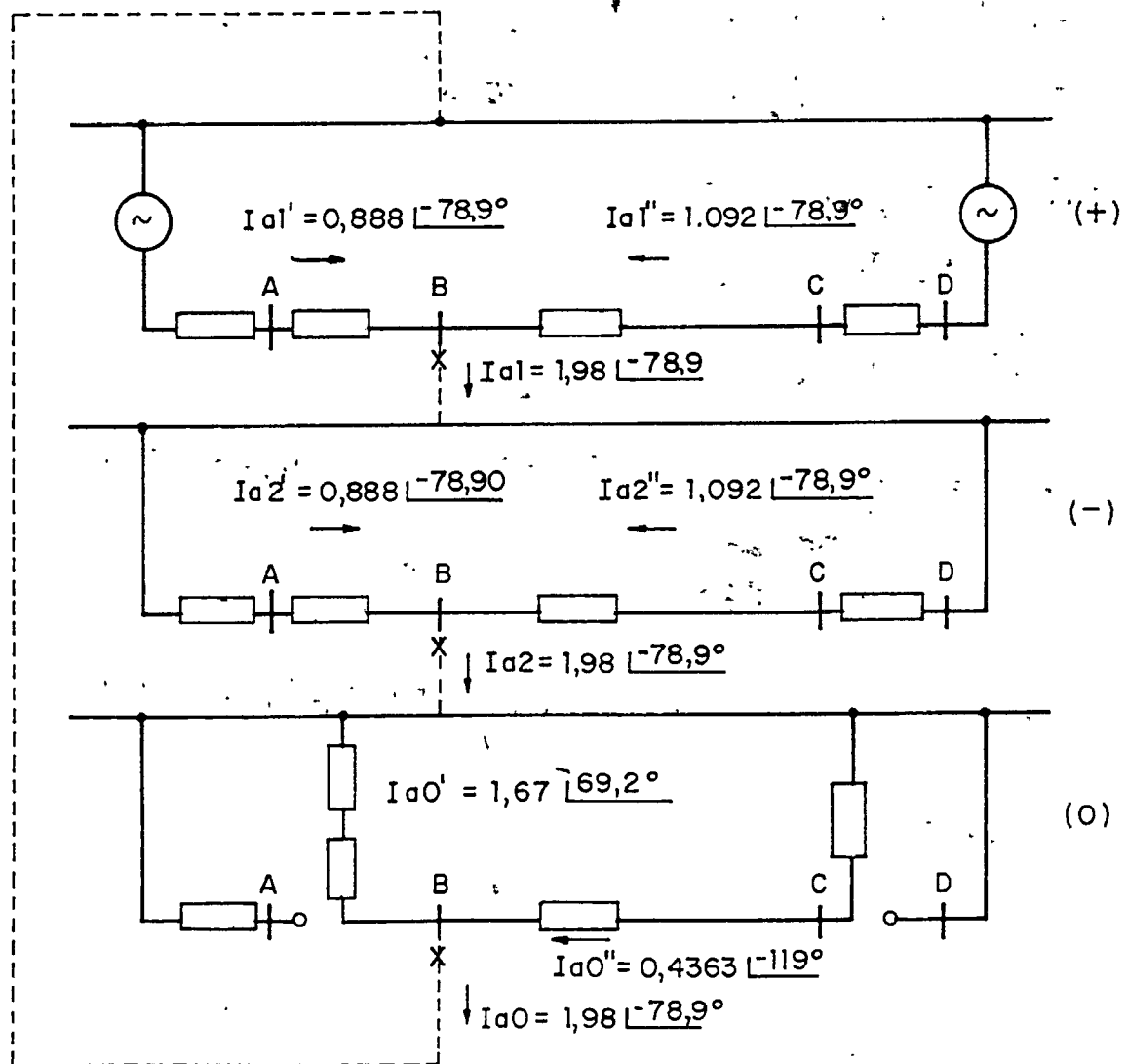


Figura 33

$$\begin{cases} I_{a0}'' = 0,4363 \underline{-119} \\ I_{a1}'' = 1,092 \underline{-78,9} \\ I_{a2}'' = 1,092 \underline{-78,9} \end{cases}$$

$$[I_{b0}'' = I_{c0}'' = I_{a0}'' = 0,4363 \underline{-119}$$

$$\begin{cases} I_{b1}'' = a^2 \cdot I_{a1}'' = 1,092 \underline{161,1} \\ I_{c1}'' = a \cdot I_{a1}'' = 1,092 \underline{41,1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{b2}'' = a \cdot I_{a2}'' = 1,092 \underline{41,1} \\ I_{c2}'' = a^2 \cdot I_{a2}'' = 1,092 \underline{161,1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_B'' = I_{b0}'' + I_{b1}'' + I_{b2}'' \\ I_B'' = 0,4363 \underline{-119} + 1,092 \underline{161,1} + 1,092 \underline{41,1} \\ I_B'' = 0,808 \underline{121,4} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_C'' = I_{c0}'' + I_{c1}'' + I_{c2}'' \\ I_C'' = 0,4363 \underline{-119} + 1,092 \underline{41,1} + 1,092 \underline{161,1} \\ I_C'' = 0,808 \underline{121,4} \end{cases}$$

Cálculo das Correntes nas Fases B e C do TR1

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{a0}' = 1,67 \angle -69,2^\circ = 0,5930 - j1,5612 \text{ pu} \\ I_{a1}' = 0,888 \angle -78,9^\circ = 0,1709 - j0,8714 \text{ pu} \\ I_{a2}' = 0,888 \angle -78,9^\circ = 0,1709 - j0,8714 \text{ pu} \end{array} \right.$$

Pela teoria de componentes simétricas:

$$I_{b0}' = I_{c0}' = I_{a0}' = 1,67 \angle -69,2^\circ$$

$$I_{b1}' = a^2 I_{a1}' = 0,888 \angle -78,9^\circ + 240^\circ = 0,888 \angle 161,1^\circ$$

$$I_{c1}' = a I_{a1}' = 0,888 \angle -78,9^\circ + 120^\circ = 0,888 \angle 41,1^\circ$$

$$I_{b2}' = a I_{a2}' = 0,888 \angle 41,1^\circ = 0,6692 + j0,5837$$

$$I_{c2}' = a^2 I_{a2}' = 0,888 \angle 161,1^\circ = -0,8401 + j0,2876$$

$$\rightarrow I_B' = I_{b0}' + I_{b1}' + I_{b2}'$$

$$1,67 \angle -69,2^\circ + 0,888 \angle 161,1^\circ + 0,888 \angle 41,1^\circ$$

$$I_B' = 0,5930 - j1,5612 - 0,8401 + j0,2876 + 0,6692 + j0,5837$$

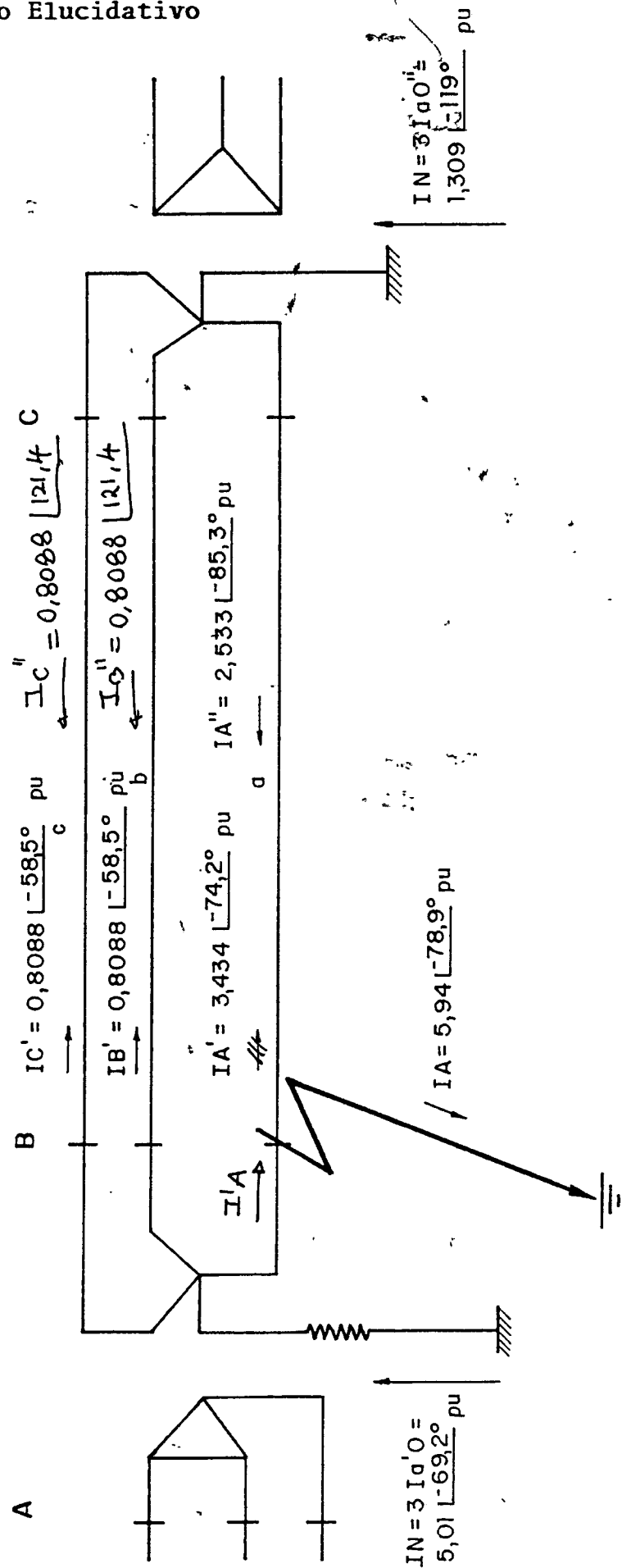
$$\Rightarrow I_B' = 0,4221 - j0,6899 = 0,8088 \angle -58,5^\circ$$

$$\rightarrow I_C' = I_{c0}' + I_{c1}' + I_{c2}'$$

$$I_C' = 0,5930 - j1,5612 + 0,6692 + j0,5837 - 0,8401 + j0,2876$$

$$\Rightarrow I_C' = 0,4221 - j0,6899 = 0,8088 \angle -58,5^\circ$$

Esquema Trifásico Elucidativo



Em Ampères

$$I_{base(alta)} = \frac{100000}{\sqrt{3} \times 63,5} = 909,24A$$

PU	AMPÈRES
5,94	5400
3,434	3122
2,533	2303
5,01	4555
1,309	1190
0,8088	735

Figura 34

OBSERVAÇÃO: quanto aos demais tipos de curto-circuito

Os curtos bisfásicos-terra são calculados através de um desenvolvimento semelhante ao do curto fase-terra.

A interligação dos diagramas de impedância das seqüências é deduzida através das condições de contorno, do mesmo modo que aquele feito para o curto fase-terra.

Curto-circuito Fase-fase (Fase B e Fase C)

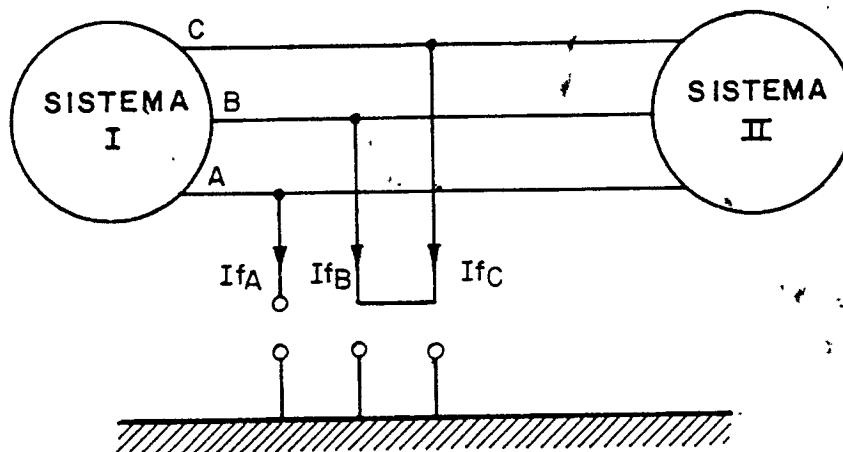


Figura 35

Analogamente ao que fizemos em Teoria (página 24), faremos:

$$I_{fA} = I_A$$

$$I_{fB} = I_B$$

$$I_{fC} = I_C$$

Para uma falta entre as fases B e C, temos:

$$I_a = 0$$

$$I_C = I_B \neq 0 \Rightarrow I_C = I_B \angle 180^\circ$$

Da teoria de componentes simétricas temos:

$$\begin{array}{c|c|c|c} \begin{array}{c} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{array} & = \frac{1}{3} & \begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{array} & \begin{array}{c} I_A \\ I_B \\ I_C \end{array} \end{array}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (0 + I_B + I_C) = 0 \text{ (não há componentes de sequência (0))}$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_B \angle 120^\circ + I_C \angle 60^\circ)$$

$$I_{a1} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_B \angle 90^\circ}{3}$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_B \angle 240^\circ + I_C \angle 300^\circ)$$

$$I_{a2} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_B \angle -90^\circ}{3}$$

Conclusão

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

As tensões, para o ponto de curto, numa falta fase-fase, são:

$$V_A \neq 0$$

$$V_B = V_C$$

Da teoria de componentes simétricas temos:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_A + V_B \angle 120^\circ + V_C \angle 240^\circ)$$

$$\Rightarrow V_{a1} = V_{a2}$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_A + V_B \angle 240^\circ + V_C \angle 120^\circ)$$

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_A + V_B + V_C) = 0$$

Consideremos agora, no ponto em curto-circuito, o Thévenin equivalente, para a sequência (+), sequência (-) e sequência (0).

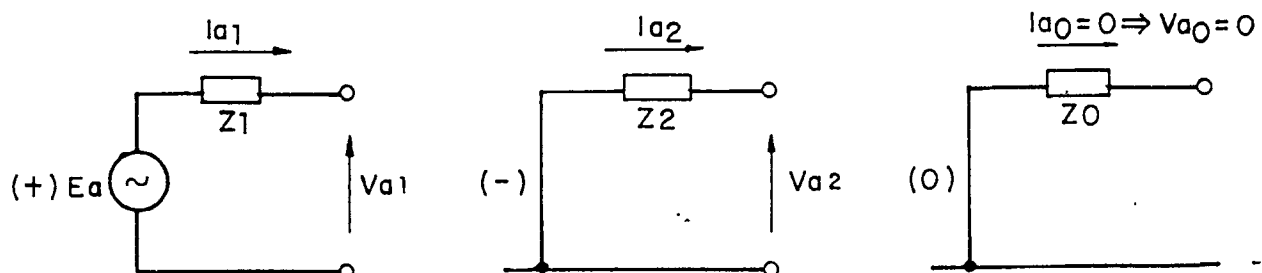


Figura 36

$$V_{a1} = E_a - Z_1 \cdot I_{a1}$$

$$V_{a2} = -Z_2 \cdot I_{a2} \Rightarrow V_{a2} = Z_2 \cdot I_{a1}$$

Como $V_{a1} = V_{a2}$, então:

$$Z_2 \cdot I_{a1} = E_a - Z_1 \cdot I_{a1}$$

$$Z_2 \cdot I_{a1} + Z_1 \cdot I_{a1} = E_a$$

$$I_{a1} (Z_1 + Z_2) = E_a$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_2 + Z_1} \quad 2F$$

As condições que devem ser obedecidas para interligação dos Thévenin equivalentes, para curtos entre as linhas B e C, são:

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_2 + Z_1}$$

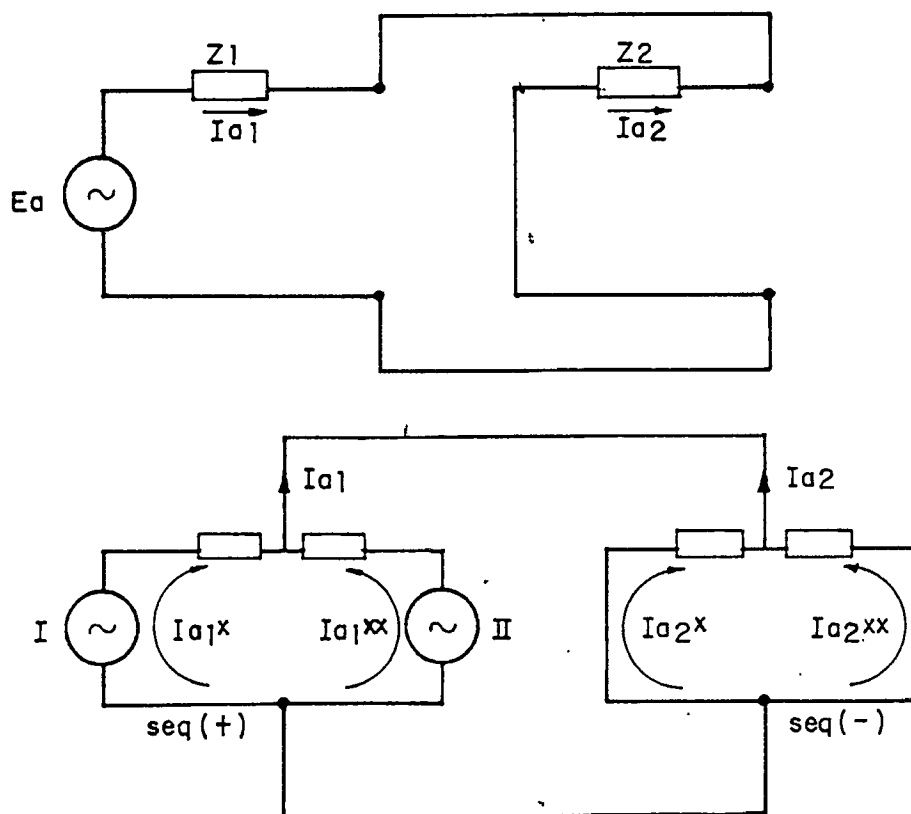


Figura 37

Curto-circuito Fase-fase-terra (Fases B e C)

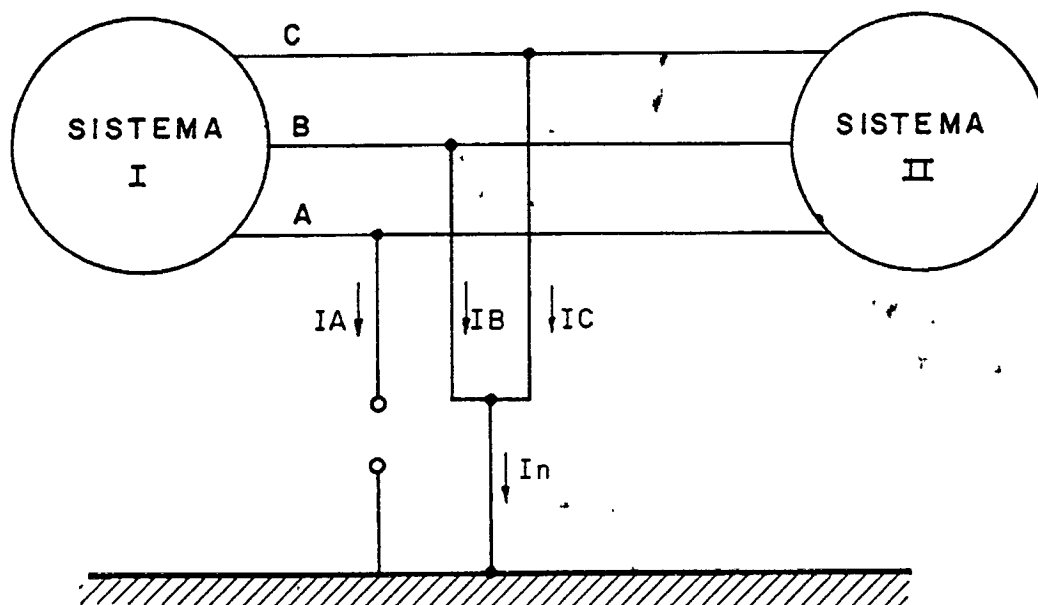


Figura 38

Para o curto, linhas B e C, à terra temos:

$$I_A = 0$$

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a0} - I_{a2}$$

$$V_A \neq 0$$

$$V_B = V_C = 0$$

Da teoria de componentes simétricas:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3} V_A \\ V_{a1} &= \frac{1}{3} V_A \\ V_{a2} &= \frac{1}{3} V_A \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{a0} = V_{a1} = V_{a2}$$

Dos Thévenin equivalentes, temos:

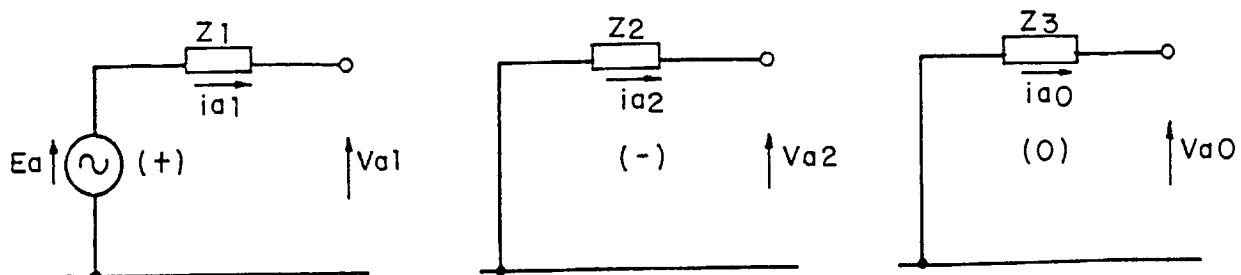


Figura 39

$$V_{a1} = E_a - Z_1.I_{a1}$$

$$V_{a2} = -Z_2.I_{a2}$$

$$V_{a0} = -Z_0.I_{a0}$$

$$V_{a1} = V_{a2} \quad E_a - Z_1.I_{a1} = -Z_2.I_{a2}$$

$$\text{Como } I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0, \text{ então}$$

$$-I_{a2} = I_{a1} + I_{a0} \quad \text{e} \quad E_a - Z_1.I_{a1} = Z_2.I_{a0} + Z_2.I_{a1} *$$

$$\text{De } V_{a1} = V_{a0}, \text{ vem: } E_a - Z_1.I_{a1} = -Z_0.I_{a0}, \text{ então}$$

$$I_{a0} = \frac{Z_1.I_{a1} - E_a}{Z_0}$$

Voltando em *:

$$E_a - Z_1.I_{a1} = \frac{Z_2.Z_1.I_{a1} - Z_2.E_a}{Z_0} + Z_2.I_{a1}$$

$$Z_0.E_a - Z_1.Z_0.I_{a1} = Z_2.Z_1.I_{a1} - Z_2.E_a + Z_2.Z_0.I_{a1}$$

$$(Z_1.Z_0 + Z_2.Z_1 + Z_2.Z_0) I_{a1} = (Z_0 + Z_2) E_a$$

$$I_{a1} = \frac{(Z_0 + Z_2) E_a}{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{E_a}{\frac{Z_1(Z_0 + Z_2) + Z_2 \cdot Z_0}{Z_0 + Z_2}} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}}$$

Para interligação dos diagramas, devemos obedecer a:

$$I_a = 0$$

$$I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2} - I_{a0}$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}}$$

2F+T

Os diagramas interligados ficarão:

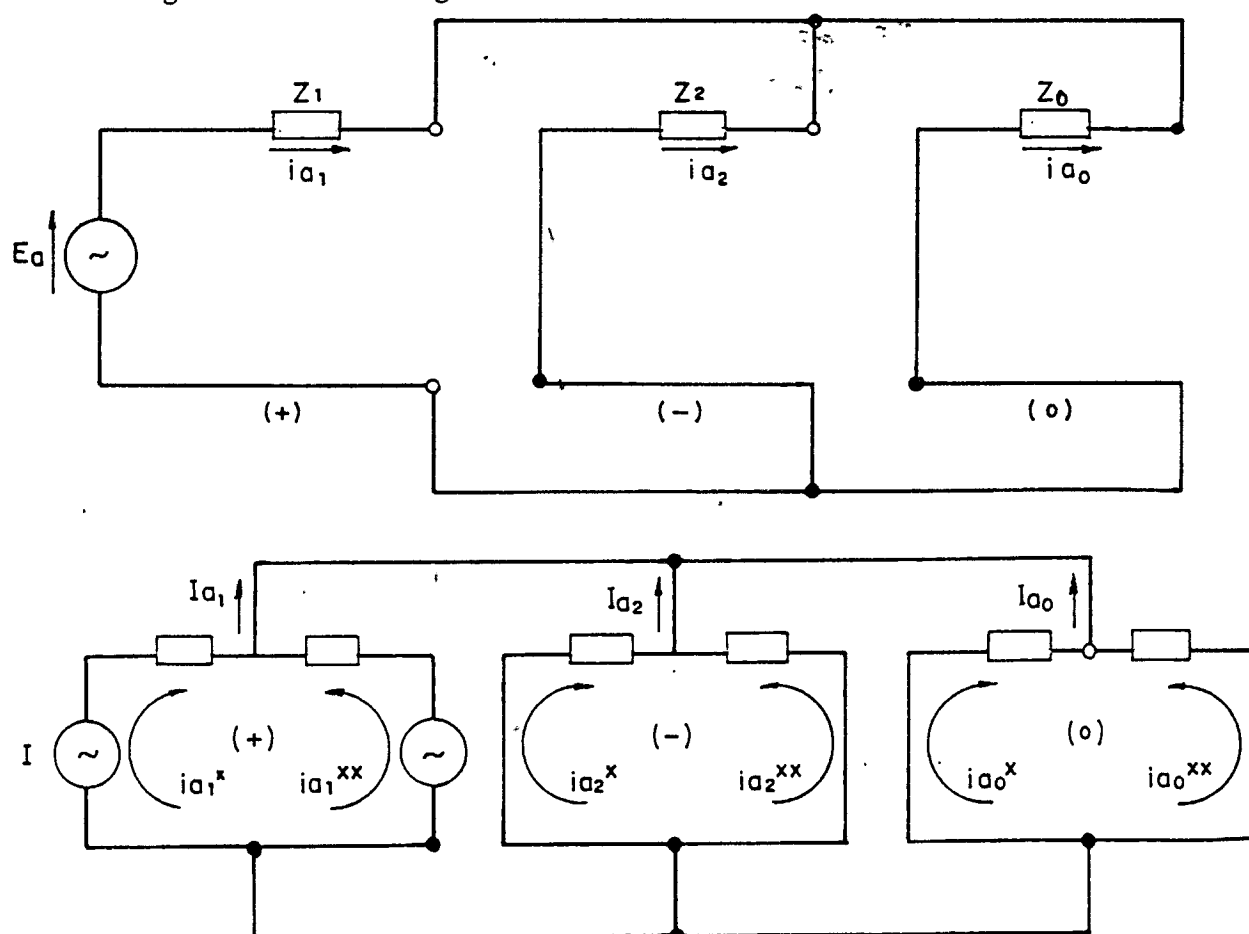


Figura 40

Exercício de Cálculo de Curto-circuito

Um gerador alimenta dois motores através de dois transformadores e uma linha de transmissão. Se ocorrer um defeito entre a fase "A" e a terra no meio da linha de transmissão, qual é a corrente de defeito, a corrente em todas as fases do sistema, tensão no ponto de defeito, tensão na barra "A"? Desprezar a corrente de carga.

Diagrama Unifilar

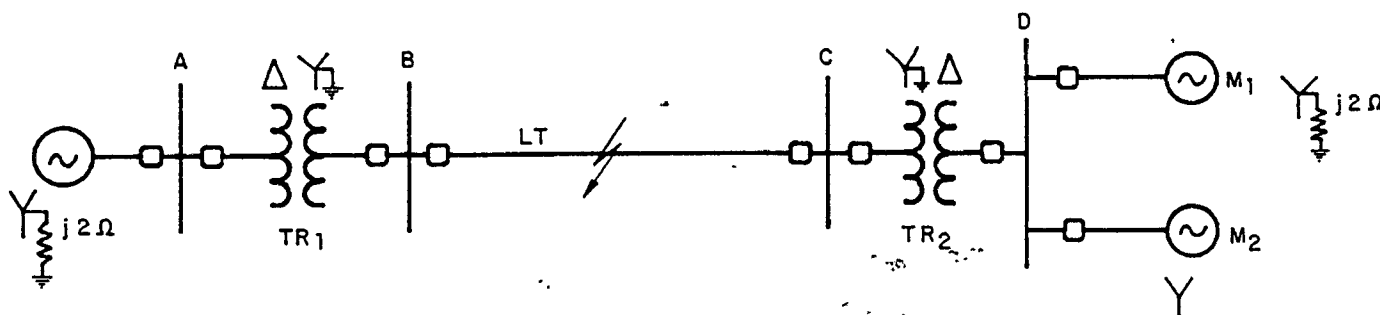


Figura 41

Gerador

$$S = 30\text{MVA}$$

$$V = 13,8\text{kV}$$

$$X'' = 15\%$$

$$X_0 = 5\%$$

$$X_{at} = j2\ \Omega$$

TR-1

$$S = 35\text{MVA}$$

$$V = 13,2\ \Delta/115Y\text{ kV}$$

$$X_1 = X_2 = X_0 = 10\%$$

LT

$$X_1 = X_2 = j80\ \Omega$$

$$X_0 = j250\ \Omega$$

TR-2

$$S = 35\text{MVA}$$

$$V = 115Y/13,2\Delta\text{ kV}$$

$$X_1 = X_2 = X_0 = 10\%$$

Motor 1

$$S = 20\text{MVA}$$

$$V = 12,5\text{kV}$$

$$X1 = X2 = 20\%$$

$$X0 = 5\%$$

$$X_{at} = j2 \Omega$$

Motor 2

$$S = 10\text{MVA}$$

$$V = 12,5\text{kV}$$

$$X1 = X2 = 20\%$$

$$X0 = 5\%$$

$$S_{base} = 30\text{MVA}$$

$$V_{base} = 13,8\text{kV (trecho do gerador)}$$

Reatância do Gerador

$$X1'' = X2'' = 0,15 \text{ pu}$$

$$X0'' = 0,05 \text{ pu}$$

$$X_{at_{pu}} = \frac{ZF}{Z_b} = \frac{2 \times 3}{6,35} = 0,946 \text{ pu}$$

Reatância do Transformador 1

$$X1 = X2 = X0 = 0,0786 \text{ pu}$$

$$Z_{PU_n} = Z_{PU_v} \left(\frac{V_{b_v}}{V_{b_n}} \right)^2 \cdot \left(\frac{S_{b_n}}{S_{b_v}} \right)$$

Reatância da Linha

$$Z_{PU_n} = \frac{ZF}{Z_b} = \frac{80}{480} = 0,1666 \text{ pu}$$

$$X_1 = X_2 = 0,1666 \text{ pu}$$

$$Z_{PU_n} = \frac{ZF}{Z_b} = \frac{250}{480} = 0,521 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0,521 \text{ pu}$$

Reatância do Transformador 2

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0,0786 \text{ pu}$$

Reatância - Motor 1

$$X_1 = X_2 = 0,246 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0,0615 \text{ pu}$$

$$X_{at} = 0,946 \text{ pu} \quad (Z_{PU_n} = \frac{ZF}{Z_b} = \frac{2 \times 3}{6,35} = 0,946 \text{ pu})$$

Reatância - Motor 2

$$X_1 = X_2 = 0,492 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0,1230 \text{ pu}$$

Diagrama de Impedância

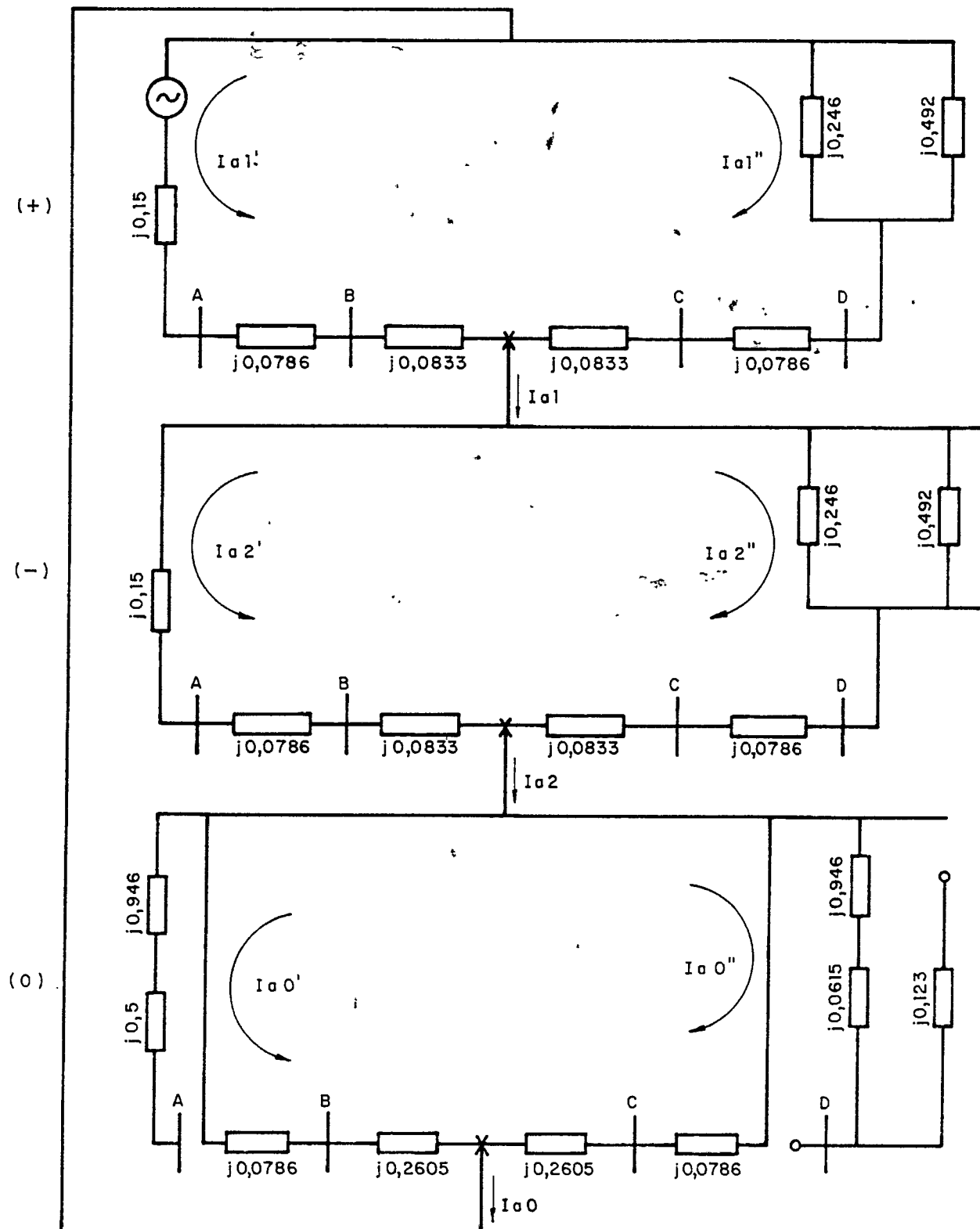


Figura 42

Aplicar Thévenin para cálculo das impedâncias de sequência (+), (-) e (0).

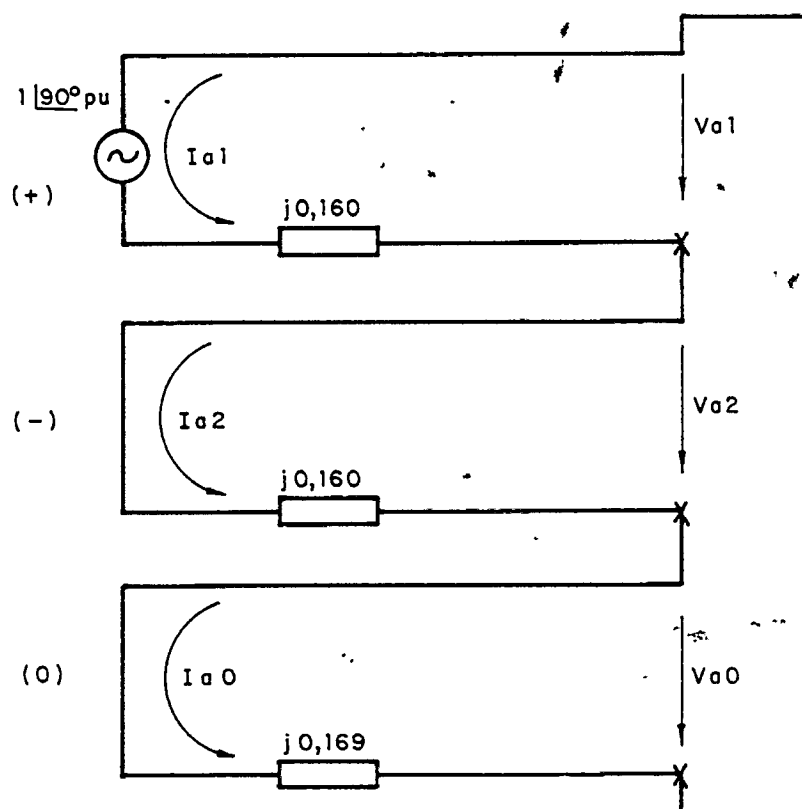


Figura 43

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0}$$

$$I_{a1} = \frac{1 \angle 90^\circ}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{1 \angle 90^\circ}{j0,160 + j0,160 + j0,169} = 2,05 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_A = 3 I_{a1} = 6,15 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_A = I_{pu} \times I_b = 6,15 \angle 0^\circ \times 144,33 = 888 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} + I_{a0} = 0$$

$$I_C = I_{c1} + I_{c2} + I_{a0} = 0$$

Cálculo das Contribuições do Transformador 1

Aplicando divisor de corrente temos:

$$I_{a1}' = 1,095 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2}' = 1,095 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0}' = 1,025 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_A' = I_{a1}' + I_{a2}' + I_{a0}'$$

$$I_A' = 3,215 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_A' = I_{pu} \times I_b = 3,215 \angle 0^\circ \times 144,33 = 464 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_B' = I_{b1}' + I_{b2}' + I_{b0}'$$

$$I_B' = 0,070 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_B' = I_{pu} \times I_b = 0,070 \angle 180^\circ \times 144,33 = 10 \angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_C' = I_{c1}' + I_{c2}' + I_{c0}'$$

$$I_C' = 0,070 \angle 180^\circ$$

$$I_C' = I_{pu} \times I_b = 0,070 \angle 180^\circ \times 144,33 = 10 \angle 180^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Contribuições do Transformador 2

Aplicando divisor de corrente temos:

$$I_{a1}'' = 0,9571 \angle 0^{\circ} \text{ pu}$$

$$I_{a2}'' = 0,9571 \angle 0^{\circ} \text{ pu}$$

$$I_{a0}'' = 1,025 \angle 0^{\circ} \text{ pu}$$

$$I_A'' = I_{a1}'' + I_{a2}'' + I_{a0}''$$

$$I_A'' = 2,9392 \angle 0^{\circ} \text{ pu}$$

$$I_A'' = 424,21 \angle 0^{\circ} \text{ A}$$

$$I_B'' = I_{b1}'' + I_{b2}'' + I_{b0}'' = 0,070 \angle 0^{\circ} \text{ pu}$$

$$I_B'' = 10 \angle 0^{\circ} \text{ A}$$

$$I_C'' = I_{c1}'' + I_{c2}'' + I_{c0}'' = 0,070 \angle 0^{\circ} \text{ pu}$$

$$I_C'' = 10 \angle 0^{\circ} \text{ A}$$

Cálculo das Correntes do Lado Gerador

Transformador Yd1 ou 30°
seq. (+) - 30°

$$I_{A_g} = 1,8966 \angle 0^{\circ} \text{ pu}$$

$$I_{A_g} = 2380 \angle 0^{\circ} \text{ A}$$

$$I_{B_g} = 1,8966 \angle 180^{\circ} \text{ pu} \quad \Rightarrow \quad I_{B_g} = 2380 \angle 180^{\circ} \text{ A}$$

$$I_C = 0$$

Cálculo das Correntes do Lado (Δ) do Transformador 2

Transformador Yd1 ou 30° - Seq. (+) -30°

$$I_A = 1,6577 \angle 0^\circ \text{ pu} \Rightarrow I_A = 2080 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_B = 1,6577 \angle 180^\circ \text{ pu} \Rightarrow I_B = 2080 \angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 0$$

Cálculo das Correntes do Motor 1

Aplicando divisor de corrente temos:

$$I_{A_m} = 1,6577 \angle 0^\circ \cdot \frac{0,492}{0,492 + 0,246} = 1,10 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{A_m} = 1387 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_{B_m} = 1,657 \angle 0^\circ \cdot \frac{0,492}{0,492 + 0,246} = 1,10 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{B_m} = 1387 \angle 180^\circ \text{ A} \Rightarrow I_C = 0$$

Cálculo das Correntes do Motor 2

Aplicando divisor de corrente temos:

$$I_{A_m} = 0,552 \angle 0^\circ \text{ pu} \Rightarrow I_{A_m} = 693,5 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_{B_m} = 0,552 \angle 180^\circ \text{ pu} \Rightarrow I_{B_m} = 693,5 \angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 0$$

Cálculo das Tensões no Ponto de Defeito

$$E_a = V_{a1} + Z_1 \cdot I_{a1}$$

$$V_{a1} = 1 \angle 90^\circ - 0,160 \angle 90^\circ \cdot 2,05 \angle 0^\circ$$

$$V_{a1} = 0,673 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a2} = -Z_2 \cdot I_{a2}$$

$$V_{a2} = -0,160 \angle 90^\circ \cdot 2,05 \angle 0^\circ$$

$$V_{a2} = 0,328 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a0} = -Z_0 \cdot I_{a0}$$

$$V_{a0} = -0,169 \angle 90^\circ \cdot 2,05 \angle 0^\circ$$

$$V_{a0} = 0,346 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$V_A = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0$$

$$V_A = 0$$

$$V_B = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_B = 1,010 \angle -30^\circ \text{ pu} \Rightarrow V_B = 121,2 \angle -30^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = \frac{120}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \text{ kV} \Rightarrow V_B = 69,28 \angle -30^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

$$V_C = 1,010 \angle -150^\circ \text{ pu}$$

$$V_C = 121,2 \angle -150^\circ \text{ kV} \Rightarrow V_C = \frac{120}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = 69,28 \angle -150^\circ \text{ kV}$$

Tensão de Defeito na Barra A

$$E_a = V_{a1} + X_g \cdot I_{a1}'$$

$$V_{a1}' = E_a - X_g \cdot I_{a1}' = 1 \angle 60^\circ - 0,15 \angle 90^\circ \cdot 1,095 \angle -30^\circ$$

$$V_{a1}' = 0,8358 \angle 60^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a2}' = -X_g \cdot I_{a2}' = -j0,15 \cdot 1,095 \angle 30^\circ$$

$$V_{a2}' = 0,1642 \angle -60^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a0}' = 0$$

$$V_A = V_{a1}' + V_{a2}' + V_{a0}'$$

$$V_A = 0,767 \angle 49,3^\circ \text{ pu}$$

$$V_A = 0,767 \angle 49,3^\circ \times 13,8 = 10,58 \angle 49,3^\circ \text{ kV}$$

$$V_A = \frac{10,58}{\sqrt{3}} \angle 49,3^\circ \text{ kV}$$

$$V_A = 6,11 \angle 49,3^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = V_{b1}' + V_{b2}' + V_{b0}'$$

$$V_B = 0,767 \angle -49,3^\circ \text{ pu}$$

$$V_B = \frac{10,58}{\sqrt{3}} \angle -49,3^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = 6,11 \angle -49,3^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = V_{C1'} + V_{C2'} + V_{C0'}$$

$$V_C = 1,0 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$V_C = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \angle 180^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = 7,96 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

$$\text{Tensões de fase e fase} \left\{ \begin{array}{l} V_{AB} = V_A - V_B \\ V_{BC} = V_B - V_C \\ V_{CA} = V_C - V_A \end{array} \right.$$

Diagrama Elucidativo (Fase-terra)

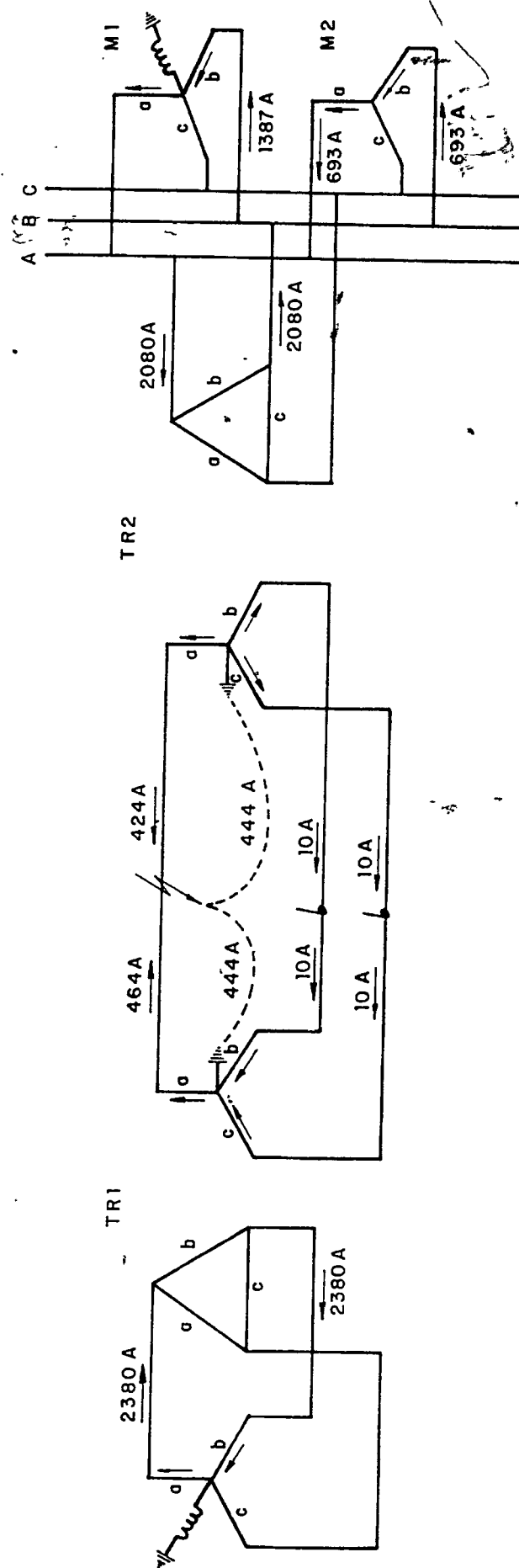


Figura 44

Cálculo de Curto-circuito Trifásico

Cálculo do ZTH

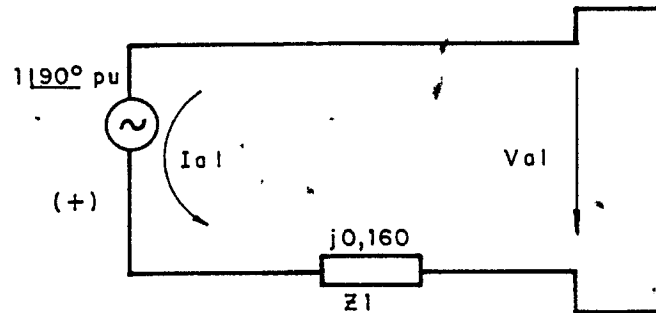


Figura 45

$$I_{a1} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}} = \frac{1 \angle 90^\circ}{0,160 \angle 90^\circ} = 6,25 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a1} = 6,25 \angle 0^\circ \text{ pu}; \quad I_{b1} = 6,25 \angle -120^\circ \text{ pu}; \quad I_{c1} = 6,25 \angle 120^\circ \text{ pu}$$

$$I_A = 902 \angle 0^\circ \text{ A}; \quad I_B = 902 \angle -120^\circ \text{ A}; \quad I_C = 902 \angle 120^\circ \text{ A}$$

Correntes de Contribuição do Transformador 1

$$I_{a1'} = \frac{1 \angle 90^\circ}{j0,15 + j0,0786 + j0,0833} = \frac{1 \angle 90^\circ}{0,311 \angle 90^\circ} = 3,21 \angle 0^\circ$$

$$I_{a1'} = 464 \angle 0^\circ \text{ A} = I_A$$

$$I_{b1'} = 464 \angle -120^\circ \text{ A} = I_B$$

$$I_{c1'} = 464 \angle 120^\circ \text{ A} = I_C$$

Correntes do lado Gerador => TR1

Yd1 ou 30°

Seq. (+) -30°

$$I_{A_g} = I_A \cdot RT = 464 \angle 0^\circ - 30^\circ \cdot 8,712 = 4042 \angle -30^\circ \text{ A}$$

$$I_{B_g} = I_B \cdot RT = 464 \angle -120^\circ - 30^\circ \cdot 8,712 = 4042 \angle -150^\circ \text{ A}$$

$$I_{C_g} = I_C \cdot RT = 464 \angle 120^\circ - 30^\circ \cdot 8,712 = 4042 \angle 90^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Tensões no Ponto de Defeito

$$E_a = V_{a1} + I_{a1} \cdot Z_1$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1} \cdot Z_1$$

$$V_{a1} = 1 \angle 90^\circ - 6,25 \angle 0^\circ \cdot 0,160 \angle 90^\circ$$

$$V_{a1} = 0 = V_A$$

$$V_{b1} = 0 = V_B$$

$$V_{c1} = 0 = V_C$$

Cálculo das Tensões na Barra A

$$E_a = V_{a1} + I_{a1}' \cdot X_g$$

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}' \cdot X_g$$

$$I_{a1}' = 6,25 \angle 0^\circ \cdot \frac{j0,3259}{j0,6378} = 3,193 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a1} = 1 \angle 60^\circ - 3,193 \angle -30^\circ \cdot 0,15 \angle 90^\circ$$

$$V_{a1} = 1 \angle 60^\circ - 0,479 \angle 60^\circ = 0,521 \angle 60^\circ \text{ pu}$$

$$V_A = 0,521 \angle 60^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 4,15 \angle 60^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = 0,521 \angle -60^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 4,15 \angle -60^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = 0,521 \angle 180^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 4,15 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

Cálculo de Curto-circuito Bifásico

Cálculo das Impedâncias Thévenin de Seq. (+) e (-)

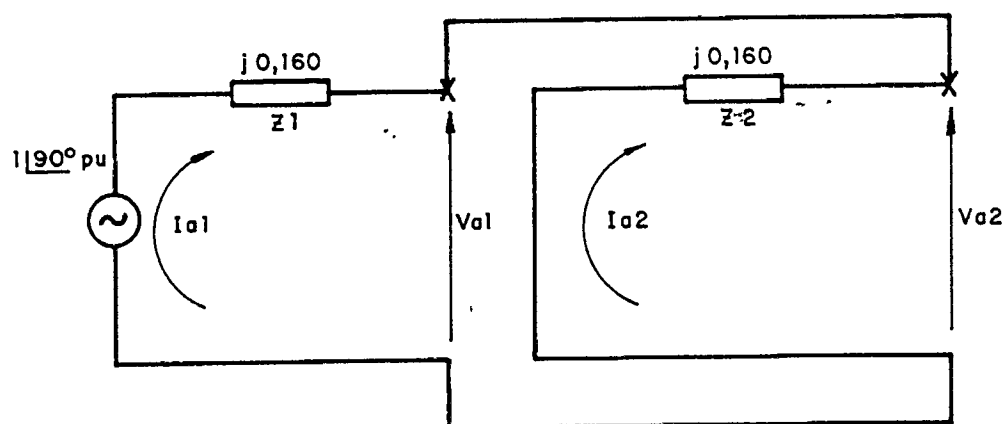


Figura 46

$$I_{a1} = \frac{V_{TH}}{Z_1 + Z_2} = \frac{1 \angle 90^\circ}{2 \times j0,160} = 3,125 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2} = 3,125 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_A = 0$$

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} = 3,125 \angle -120^\circ + 3,125 \angle -60^\circ = 5,412 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_B = 780 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_C = I_{c1} + I_{c2} = 3,125 \angle 120^\circ + 3,125 \angle 60^\circ = 5,412 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$I_C = 780 \angle +90^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Contribuições do Transformador 1

$$I_{a1}' = 3,125 \angle 0^\circ \cdot \frac{j0,3259}{j0,6378} = 1,596 \angle 0^\circ$$

$$I_{a2}' = 1,596 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0}' = 0$$

$$I_A' = 0 = I_{a1}' + I_{a2}'$$

$$I_B' = I_{b1}' + I_{b2}' = 1,596 \angle -120^\circ + 1,596 \angle -60^\circ =$$

$$I_B' = 2,764 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_B' = 398,9 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_C' = I_{c1}' + I_{c2}' = 1,596 \angle 120^\circ + 1,596 \angle 60^\circ = 2,764 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$I_C' = 398,9 \angle 90^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Contribuições do Transformador 2

$$I_{a1}'' = 3,125 \angle 0^\circ \cdot j0,6378 = 1,528 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2}'' = 1,528 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0}'' = 0$$

$$I_A'' = I_{a1}'' + I_{a2}'' = 1,528 \angle 0^\circ + 1,528 \angle 180^\circ = 0$$

$$I_B'' = I_{b1}'' + I_{b2}'' = 1,528 \angle -120^\circ + 1,528 \angle -60^\circ$$

$$I_B'' = 2,646 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_B'' = 381,9 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_C'' = I_{c1}'' + I_{c2}'' = 1,528 \angle 120^\circ + 1,528 \angle 60^\circ = 2,646 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$I_C'' = 381,9 \angle 90^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Correntes do lado Gerador

$$I_{A_g} = 1,596 \angle -30^\circ + 1,596 \angle 210^\circ = 1,596 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{A_g} = 2002 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_{B_g} = 1,596 \angle -150^\circ + 1,596 \angle -30^\circ = 1,596 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{B_g} = 2002 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_{C_g} = 1,596 \angle 90^\circ + 1,596 \angle 90^\circ = 3,192 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{C_g} = 4004 \angle 90^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Correntes do lado dos Motores

$$I_{a1}'' = 1,528 \angle -30^\circ \text{ pu}; \quad I_{a2}'' = 1,528 \angle 210^\circ$$

$$I_A = 1,528 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_A'' = 1917 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_B'' = I_{b1}'' + I_{b2}'' = 1,528 \angle -150^\circ + 1,528 \angle -30^\circ$$

$$I_B'' = 1,528 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_B'' = 1917 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_C'' = I_{c1}'' + I_{c2}'' = 1,528 \angle 90^\circ + 1,528 \angle 90^\circ = 3,056 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$I_C'' = 3834 \angle 90^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Tensões no Ponto de Defeito

$$V_{a1} = E_a - Z_1 \cdot I_{a1} = 1 \angle 90^\circ - j0,160 \cdot 3,125 \angle 0^\circ = 0,5 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a2} = -Z_2 \cdot I_{a2} = -j0,160 \cdot 3,125 \angle 180^\circ = 0,5 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a0} = 0$$

$$V_A = 0,5 \angle 90^\circ + 0,5 \angle 90^\circ = 1,0 \angle 90^\circ$$

$$V_A = \frac{120}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \Rightarrow V_A = 69,28 \angle 90^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = V_{b1} + V_{b2} = 0,5 \angle -30^\circ + 0,5 \angle -150^\circ = 0,5 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$V_B = \frac{60}{\sqrt{3}} \angle -90^\circ \Rightarrow V_B = 34,6 \angle -90^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = V_{C1} + V_{C2} = 0,5 \angle -150^\circ + 0,5 \angle -30^\circ = 0,5 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$V_C = \frac{60}{\sqrt{3}} \angle -90^\circ \Rightarrow V_C = 34,6 \angle -90^\circ \text{ kV}$$

Cálculo das Tensões na Barra A

$$V_{a1}' = E - I_{a1}' \cdot X_g = 1 \angle 60^\circ - 1,596 \angle -30^\circ \cdot 0,15 \angle 90^\circ$$

$$V_{a1}' = 1 \angle 60^\circ - 0,2394 \angle 60^\circ = 0,7606 \angle 60^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a2}' = -I_{a2}' \cdot X_g = -1,596 \angle 210^\circ \cdot 0,15 \angle 90^\circ = 0,2394 \angle 120^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a0} = 0$$

$$V_A = V_{a1}' + V_{a2}' = 0,7606 \angle 60^\circ + 0,2394 \angle 120^\circ$$

$$V_A = 0,904 + j0,866 = 0,904 \angle 73,2^\circ \text{ pu}$$

$$V_A = 0,904 \angle 73,2^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 7,2 \angle 73,2^\circ \text{ kV}$$

$$V_A = 7,2 \angle 73,2^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = V_{b1}' + V_{b2}' = 0,7606 \angle -60^\circ + 0,2394 \angle -120^\circ$$

$$V_B = 0,904 \angle -73,2^\circ \text{ pu}$$

$$V_B = 0,904 \angle -73,2^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 7,2 \angle -73,2^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = 7,2 \angle -73,2^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = V_{C1'} + V_{C2'} = 0,7606 \angle 180^\circ + 0,2394 \angle 0^\circ = 0,5212 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$V_C = 0,5212 \angle 180^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 4,152 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = 4,152 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

Cálculo de Curto-circuito Bifásico e Terra (BC e Terra)

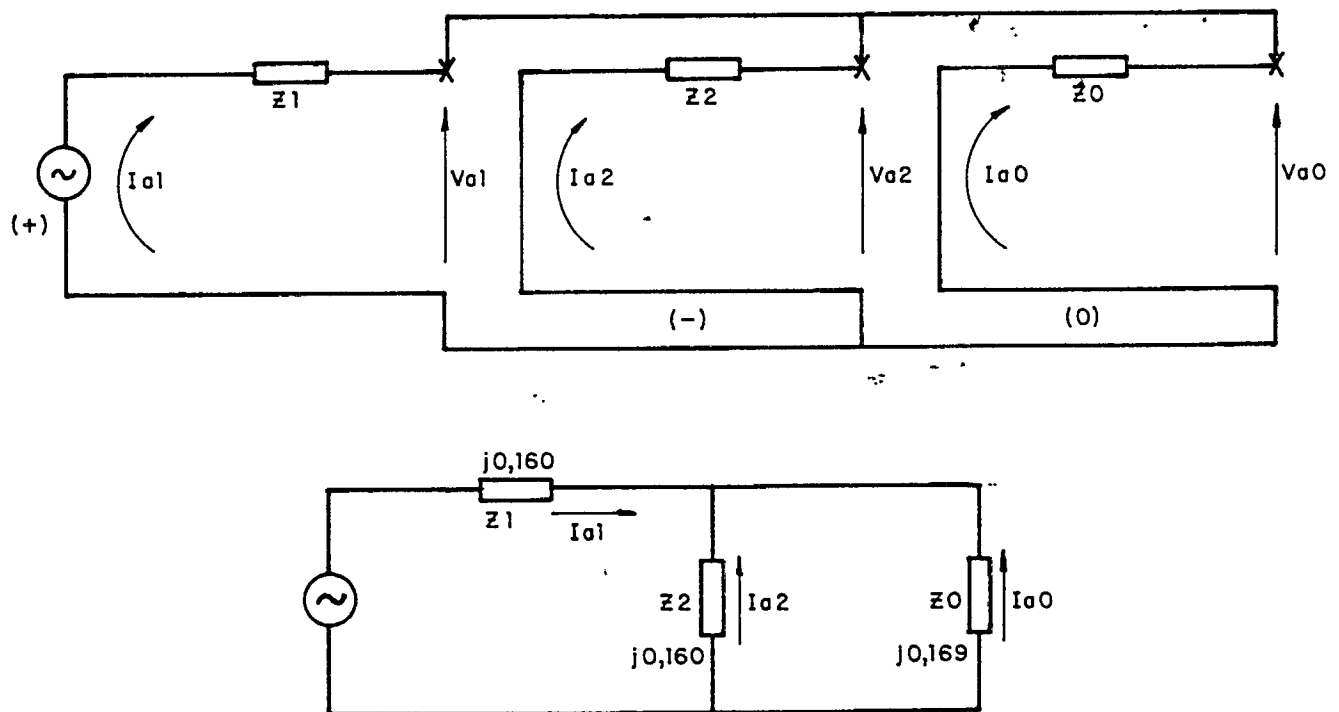


Figura 47

$$I_{a1} = \frac{V_T}{Z_1 + \frac{Z_0 \cdot Z_2}{Z_0 + Z_2}}$$

$$I_{a1} = -I_{a2} - I_{a0}$$

$$I_{a1} = 4,1289 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$-I_{a2} = I_{a1} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} = 4,1289 \frac{0,169}{0,169 + 0,160} = 2,1206 \angle 0^\circ$$

$$I_{a2} = 2,1206 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0} = 2007 \angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 4,128 \angle 0^\circ + 2,120 \angle 180^\circ + \\ + 2,007 \angle 180^\circ$$

$$I_A = 0$$

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} = 4,128 \angle -120^\circ + 2,120 \angle -60^\circ + \\ + 2,007 \angle 180^\circ$$

$$I_B = 6,1923 \angle -120^\circ \text{ pu}$$

$$I_B = 893,73 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$I_C = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = 4,128 \angle 120^\circ + 2,1206 \angle 60^\circ + \\ + 2,007 \angle 180^\circ$$

$$I_C = 6,1923 \angle 120^\circ \text{ pu}$$

$$I_C = 893,73 \angle 120^\circ \text{ A}$$

Contribuição das Correntes do Transformador 1

$$I_{a1} = 4,128 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2} = 2,1206 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0} = 2,007 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a1}' = 4,128 \angle 0^\circ \cdot \frac{0,3259 \angle 90^\circ}{0,6368 \angle 90^\circ} = 2,112 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2}' = 2,1206 \angle 180^\circ \cdot \frac{0,3259 \angle 90^\circ}{0,6368 \angle 90^\circ} = 1,0853 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0}' = 2,007 \angle 180^\circ \cdot \frac{j0,3391}{j0,6782} = 1,0038 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_A' = I_{a1}' + I_{a2}' + I_{a0}' = 2,112 \angle 0^\circ + 1,0853 \angle 180^\circ + 1,0038 \angle 180^\circ$$

$$I_A' = 0$$

$$I_B' = I_{b1}' + I_{b2}' + I_{b0}' = 2,112 \angle -120^\circ + 1,0853 \angle -60^\circ + 1,0038 \angle 180^\circ$$

$$I_B' = -1,516 - j2,768 = 3,156 \angle -120^\circ \text{ pu}$$

$$I_B' = 455,4 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$I_C' = I_{c1}' + I_{c2}' + I_{c0}' = 2,112 \angle 120^\circ + 1,0853 \angle 60^\circ + 1,0038 \angle 180^\circ$$

$$I_C' = 3,156 \angle 120^\circ$$

$$I_C' = 455,4 \angle 120^\circ \text{ A}$$

Contribuição das Correntes do Transformador 2

$$I_{a1} = 4,128 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2} = 2,1206 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0} = 2,007 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a1}'' = 4,128 \angle 0^\circ \cdot \frac{j0,3119}{j0,6378} = 2,018 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a2}'' = 2,1206 \angle 180^\circ \cdot \frac{j0,3119}{j0,6378} = 1,037 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_{a0}'' = 2,007 \angle 180^\circ \cdot \frac{0,3391 \angle 90^\circ}{0,6782 \angle 90^\circ} = 1,004 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$I_A'' = I_{a1}'' + I_{a2}'' + I_{a0}'' = 0$$

$$I_B'' = I_{b1}'' + I_{b2}'' + I_{b0}'' = 2,018 \angle -120^\circ + 1,037 \angle -60^\circ + 1,004 \angle 180^\circ$$

$$I_B'' = -1,494 - j2,645 = 3,037 \angle -120^\circ \text{ pu}$$

$$I_B'' = 438,44 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$I_C'' = I_{c1}'' + I_{c2}'' + I_{c0}'' = 2,018 \angle 120^\circ + 1,037 \angle 60^\circ + 1,004 \angle 180^\circ$$

$$I_C'' = 3,037 \angle 120^\circ \text{ pu}$$

$$I_C'' = 438,44 \angle 120^\circ \text{ A}$$

Contribuições das Correntes do lado Gerador

$$I_{A_g}' = I_{a1}' + I_{a2}' = 2,112 \angle -30^\circ + 1,0853 \angle 210^\circ =$$

$$I_{A_g}' = 0,8891 - j1,5987$$

$$I_{A_g} = 1,829 \angle -60^\circ$$

$$I_{A_g} = 2295,7 \angle -60^\circ \text{ A}$$

$$I_{B_g} = I_{b1}' + I_{b2}' + I_{b0}' = 2,112 \angle -150^\circ + 1,0853 \angle -30^\circ =$$

$$I_{B_g} = 1,829 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$I_{B_g} = 2295 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$I_{C_g} = I_{c1}' + I_{c2}' = 2,112 \angle 90^\circ + 1,0853 \angle 90^\circ = 3,1973 \angle 90^\circ$$

$$I_{C_g} = 4012,6 \angle 90^\circ \text{ A}$$

Cálculo das Tensões no Ponto de Defeito

$$V_{a1} = E_a - Z_1 \cdot I_{a1} = 1 \angle 90^\circ - 0,160 \angle 90^\circ \cdot 4,125 \angle 0^\circ$$

$$V_{a1} = 0,3394 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a2} = -Z_2 \cdot I_{a2} = -0,160 \angle 90^\circ \cdot 2,1206 \angle 180^\circ$$

$$V_{a2} = 0,3394 \angle 90^\circ$$

$$V_{a0} = -Z_0 \cdot I_{a0} = -0,169 \angle 90^\circ \cdot 2,007 \angle 180^\circ$$

$$Va0 = 0,3394 \angle 90^\circ$$

$$VA = Va1 + Va2 + Va0$$

$$VA = 1,0 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$VA = 1,0 \angle 90^\circ \cdot \frac{120}{\sqrt{3}} = 69,28 \angle 90^\circ \text{ kV}$$

$$VA = 69,28 \angle 90^\circ \text{ kV}$$

$$VB = Vb1 + Vb2 + Vb0 = 0,3394 \angle -30^\circ + 0,3394 \angle -150^\circ + \\ + 0,3394 \angle 90^\circ \text{ kV}$$

$$VB = 0$$

$$VC = Vc1 + Vc2 + Vc0 = 0,3394 \angle -150^\circ + 0,3394 \angle -30^\circ + \\ + 0,3394 \angle 90^\circ$$

$$VC = 0$$

Cálculo das Tensões na Barra A

$$Va1' = Ea - Xg \cdot Ia1' = 1 \angle 60^\circ - 0,15 \angle 90^\circ \cdot 2,112 \angle -30^\circ$$

$$Va1' = 1 \angle 60^\circ - 0,3168 \angle 60^\circ = 0,6832 \angle 60^\circ \text{ pu}$$

$$Va2' = -Xg \cdot Ia2' = -0,15 \angle 90^\circ \cdot 1,0853 \angle 210^\circ$$

$$Va2' = 0,1628 \angle 120^\circ$$

$$V_{a0'} = 0$$

$$V_A = V_{a1'} + V_{a2'} = 0,6832 \angle 60^\circ + 0,1628 \angle 120^\circ$$

$$V_A = 0,2602 + j0,732$$

$$V_A = 0,776 \angle 70^\circ \text{ pu}$$

$$V_A = 0,776 \angle 70^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 6,18 \angle 70^\circ \text{ kV}$$

$$V_A = 6,18 \angle 70^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = V_{b1'} + V_{b2'} = 0,6832 \angle -60^\circ + 0,1628 \angle -120^\circ$$

$$V_B = 0,776 \angle -70^\circ \text{ pu}$$

$$V_B = 0,776 \angle -70^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 6,18 \angle -70^\circ \text{ kV}$$

$$V_B = 6,18 \angle -70^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = V_{c1'} + V_{c2'} = 0,6832 \angle 180^\circ + 0,1628 \angle 0^\circ$$

$$V_C = 0,5204 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

$$V_C = 0,5204 \angle 180^\circ \cdot \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 4,14 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

$$V_C = 4,14 \angle 180^\circ \text{ kV}$$

BIBLIOGRAFIA

CESP. Sistema de excitação de geradores síncronos – Instrução TM/067/81_223P.

STEVENSON, W.D. Elementos de análise de sistemas de potência.
Mc Graw Hill do Brasil Ltda., 1978. 347p.

Impressão: Gráfica CESP
Ilha Solteira/Setembro/1997

Tiragem: 18 exemplares



**GOVERNO DO
ESTADO DE SÃO PAULO**



CESP
Companhia
Energética de
São Paulo